

FICHES ACTIONS DU DISPOSITIF LOG-TE

Programme REMOVE

Secteur MARITIME

Guide PILOTINES

Version juin 2024

Sommaire

Sommaire	3
Introduction aux fiches actions	4
Présentation synthétique des fiches actions	8
Axe 1 : Optimisation des pilotines.....	11
A1 FA 1 : Dimensionnement du moteur aux conditions de navigation	12
A1 FA 2 : Carénage de la pilotine	16
Axe 2 : Mode de propulsion	19
A2 FA 1 : Electrique	20
A2 FA 2 : Hydrogène	24
A2 FA 3 : GNV	29
A2 FA 4 : Biocarburants	39
A2 FA 5 : Collecte et analyse des informations	45
Axe 3 : Information / sensibilisation	49
A3 FA 1 : Formations	50
A3 FA 2 : Participations à des sessions d’information.....	53
Axe 4 : Organisation des flux.....	55
A4 FA 1 : Organisation du trajet des pilotines par le groupage des pilotes	56
A4 FA 2 : Réduction de la vitesse	59

Introduction aux fiches actions

Présentation du programme REMOVE

Le report modal des transports de marchandises vers les modes les plus économes en énergie et les moins émetteurs est ressorti comme levier d'action dans la stratégie française de lutte contre le changement climatique.

C'est dans ce cadre que la convention de mise en œuvre du Programme REMOVE « Report modal et verdissement des flottes de transport massifié » a été élaborée, en tant qu'opération certificat d'économie d'énergie.

Le Programme global REMOVE s'articule ainsi autour de deux composantes :

- Accélération du report modal des marchandises de la route vers un mode de transport massifié tel que le fleuve, le maritime (cabotage) et le fer, et mutation des chaînes logistiques routières vers des chaînes massifiées et/ou multimodales ;
- Accompagnement des acteurs vers une amélioration des performances énergétiques et environnementales de leurs flottes de transport massifié (fluviale, ferroviaire, cabotage maritime et pêche professionnelle) ainsi que des moyens de manutention associés.

Le Programme s'appuie sur deux dispositifs pour concrétiser ces objectifs :

- REMO en faveur du REport MODal du transport routier de marchandises vers les modes massifiés ;
- LOG-te, pour la Transition Énergétique des flottes de transport massifié et alternatives à la route.

Présentation du dispositif LOG-te

Au sein du Programme REMOVE, le dispositif LOG-te s'attache donc à :

- Sensibiliser les opérateurs du transport fluvial, ferroviaire et maritime (cabotage et pêche professionnelle) à la transition énergétique et environnementale de leurs flottes et engins de manutention associés ;
- Accompagner techniquement ces opérateurs en vue de l'obtention de chartes d'engagements volontaires.

Cette charte, basée sur le volontariat, engage chaque opérateur signataire dans un plan d'actions personnalisé, en vue de diminuer sa consommation de carburant, et par voie de conséquence ses émissions de GES.

Chaque opérateur décidant de signer la charte d'engagements volontaires doit au préalable avoir réalisé un reporting énergétique et établi un plan d'actions pluriannuel.

Objectifs des fiches actions

Outils d'aide à la décision, les fiches actions sont destinées à informer de manière objective et indépendante les opérateurs de transport massifié sur les solutions ayant un impact positif en termes d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de GES.

Le dispositif LOG-te les intègre dans la partie réservée à l'évaluation des gains potentiels d'énergie et d'émissions de GES, afin de permettre aux opérateurs de simuler et de définir un plan d'actions spécifique à leurs propres activités.

Organisation des fiches actions

Les fiches actions sont organisées autour de **4 axes** :

- Axe 1 : Optimisation des pilotines
- Axe 2 : Mode de propulsion
- Axe 3 : Information / sensibilisation
- Axe 4 : Organisation des flux

Les axes 1 et 2 concernent les pilotines elles-mêmes, l'axe 4 l'optimisation de leurs flux et l'axe 3 travaille sur le facteur humain.

L'axe 1 « Optimisation des pilotines » regroupe les actions impactant directement les pilotines, en travaillant sur l'existant, sans changer leur énergie de propulsion.

L'axe 2 « Mode de propulsion » traite des autres modes de propulsion que le Diesel ainsi que du suivi des consommations.

L'axe 3 « Information / sensibilisation », se concentre sur le comportement de conduite des pilotes de pilotines.

L'axe 4 « Organisation des flux » concerne des actions visant à optimiser les trajets et la vitesse des pilotines qui les effectue.

Grille de lecture des fiches actions

Il s'agira pour chaque acteur de faire une lecture des fiches actions qui soit adaptée à sa situation, en ayant pris soin de réaliser son reporting énergétique au préalable.

En effet, les actions et solutions proposées sont des recommandations, qui devront faire l'objet d'une analyse de leur pertinence face aux spécificités de l'activité exercée, aux moyens utilisés, aux besoins d'exploitation, au contexte réglementaire et au niveau de performance de chacun.

C'est pourquoi, afin d'en faciliter la lecture, chaque fiche action est structurée autour :

- D'une fiche de synthèse,
- D'un point sur le contexte et la réglementation,
- De fiches détaillées par solution (en effet, une action peut se décliner en plusieurs solutions opérationnelles).

On retrouve systématiquement les mêmes rubriques dans chaque fiche.

La fiche de synthèse

L'objectif de la fiche de synthèse est de résumer en une page l'action visée et ses solutions associées. Il s'agit de permettre à chaque opérateur d'identifier immédiatement si les solutions proposées sont pertinentes ou non au regard de sa propre situation. Chaque fiche de synthèse est organisée de la manière suivante :

- Une description succincte de l'action ;
- Son domaine de pertinence ;
- Les solutions associées à l'action, listant les différentes solutions ;
- Des informations sur le contexte et la réglementation.

Référence de la fiche action

Thème de la fiche action → A2 FA 5 : Collecte et analyse des informations

Description → **Synthese**

Domaine de pertinence → 1. Description de l'action

Présentation des solutions → 2. Domaine de pertinence

Contexte et réglementation → 3. Solutions associées

4. Contexte et réglementation

LOG-te A2 FA 5

Page 56

Présentation d'une fiche de synthèse résumant les solutions proposées

Les fiches solutions

Les pages qui suivent sont organisées par solution.

Référence de la fiche action → A2 FA 5

Nom de la solution → Solution 1 : Écomètre

Explication de la solution → 1. Principes

Impact sur les améliorations énergétiques → 2. Impact sur les améliorations énergétiques

Domaine de pertinence → 3. Domaine de pertinence

Mise en œuvre → 4. Mise en œuvre

Suivi de la solution → 5. Suivi de la solution

LOG-te A2 FA 5

Page 58

Page 59

Présentation de chaque solution

Chaque solution est analysée au moyen des rubriques suivantes :

- **Principes** : cette rubrique vise à décrire la solution de manière pédagogique ;
- **Impact sur les améliorations énergétiques** : les gains de consommation d'énergie et d'émission de CO₂e doivent être considérés comme des ordres de grandeur indicatifs. Ils sont issus, soit d'évaluations menées par l'ADEME, soit de retours d'expérience de professionnels représentatifs, soit d'études plus théoriques. Les sources sont systématiquement explicitées. Les gains réels pourront être différents de ces estimations moyennes et dépendront notamment du type d'engin, des caractéristiques de l'opérateur, de ses activités, de son

implantation géographique et plus généralement de sa situation initiale au moment de son adhésion au dispositif.

Lorsqu'une fourchette de gain est identifiée (car dépendant de situations opérationnelles contrastées), la valeur moyenne de cette estimation est retenue pour alimenter le gain par défaut de l'outil Excel de création du plan d'actions.

- **Domaine de pertinence** : il est spécifié dans quels cas (secteurs d'activités, catégories d'engins et d'usage...) il est pertinent de mettre en œuvre la solution considérée.
- **Mise en œuvre** : des conseils pratiques sont donnés sur la mise en œuvre de la solution. Lorsque l'information est accessible, une indication en termes de coûts ou surcoûts est fournie.
- **Suivi de la solution** : pour chaque solution, sont listés le ou les indicateurs de suivi qui doivent être utilisés, ainsi que les modalités pratiques de collecte des données nécessaires pour mettre en œuvre la solution de manière effective et assurer son suivi.

Les catégories de pilotines

Toutes les typologies de pilotines sont prises en compte.



Exemple de pilotine en action (source : Pilotage Marseille)

Règles de cumul des gains

La plupart des solutions sont indépendantes les unes des autres, ce qui permet aux gains de se cumuler. En effet, l'objectif des actions du dispositif d'engagement est de minimiser les consommations énergétiques (et donc les émissions de GES).

Il est à noter que les gains relatifs à plusieurs solutions ne s'additionnent pas mais se multiplient.

Ex : 3 solutions cumulées permettant chacune d'améliorer de 10 % l'efficacité énergétique n'ont pas un gain cumulé de 30 % (10 % + 10 % + 10 %) mais de 27 % (1 - (1-10 %) x (1-10 %) x (1-10 %)).

Il faut néanmoins nuancer cette vision simplifiée car certaines solutions proposées ont le même objectif. Même si elles peuvent être choisies par l'opérateur comme complémentaires, cumuler les gains associés reviendrait à surévaluer les gains potentiels.

Au final, du fait que les valeurs de gains sont indicatives (reposant sur des valeurs moyennes) et que les périmètres de choix des actions sont parfois différents, il devient très compliqué de prévoir comment les actions interagissent entre elles. Seule la réalité de la mise en œuvre des actions permettra d'identifier les gains globaux réels, mais la structure qui s'engage doit en amont se poser ces questions pour ajuster au mieux les gains proposés par défaut dans le plan d'actions qu'elle aura sélectionné.

Présentation synthétique des fiches actions

Les tableaux récapitulatifs ci-après présentent par axe l'ensemble des actions et solutions identifiées, en faisant un focus sur :

- Les **gains énergétiques** et les **gains en termes d'émissions de GES**,
- Le temps de **retour sur investissement** et le niveau de **faisabilité** de la solution considérée.

Les gains sont exprimés en pourcentage de réduction, ainsi un gain positif correspond bien à une réduction des consommations énergétiques (ou des émissions de GES). Un gain négatif (surconsommation) est surligné en orange clair ().

Les temps de retour sur investissements sont pour l'instant systématiquement vides du fait du manque de données disponibles.

L'échelle de faisabilité se lit comme suit : + = complexe, ++ = moyenne, +++ = facile.

Fiches action	Solutions	Gain énergétique	Gain GES	Temps de retour sur investissement	Faisabilité
Axe 1 - Optimisation des pilotines					
A1 FA1 : Dimensionnement du moteur aux conditions de navigation	Dimensionnement du moteur	Variable	Variable		+
A1 FA2 : Carénage de la pilotine	Carénage	20%	20%		++

Fiches action	Solutions	Gain énergétique	Gain GES	Temps de retour sur investissement	Faisabilité
Axe 2 - Mode de propulsion					
A2 FA1 : Electrique	100 % électrique	61%	84%		+
A2 FA2 : Hydrogène	100 % hydrogène	30%	Variable		+
A2 FA3 : GNV	100 % GNV	-22%	3% à 20% (GNV) 80% (bioGNV)		+
	Hybride GNV-diesel	Variable	Variable		+
	Hybride GNV-hydrogène	Variable	Variable		+
A2 FA4 : Biocarburants	B100	-5% à 0%	60%		+
	HVO	-10% à -5%	82%		+
A2 FA5 : Collecte et analyse des informations	Economètre	Indirect	Indirect		++

Fiches action	Solutions	Gain énergétique	Gain GES	Temps de retour sur investissement	Faisabilité
Axe 3 - Information/sensibilisation					
A3 FA1 : Formation	Ecopilotage	4,5%	4,5%		+++
A3 FA2 : Participation à des sessions d'information	Sessions d'information	Indirect	Indirect		+++

Fiches action	Solutions	Gain énergétique	Gain GES	Temps de retour sur investissement	Faisabilité
Axe 4 - Organisation des flux					
A4 FA1 : Optimisation du trajet des pilotines par le groupage des pilotes	Regroupement des pilotes	Variable	Variable		++
A4 FA2 : Réduction de la vitesse	Réduction de la vitesse	10% à 15%	10% à 15%		++

Axe 1 : Optimisation des pilotines

A1 FA 1 : Dimensionnement du moteur aux conditions de navigation	12
Solution 1 : Dimensionnement du moteur.....	14
A1 FA 2 : Carénage de la pilotine	16
Solution 1 : Carénage	18

A1 FA 1 : Dimensionnement du moteur aux conditions de navigation

Synthèse

1. Description de l'action

Nombreux sont les facteurs jouant sur les besoins énergétiques des moteurs. La houle, la vitesse du vent, la force du courant font partie de ces paramètres qui impliquent différentes conditions de navigation auxquelles les pilotes sont formés. Cela demande à un moteur de fonctionner sous différents régimes, ce qui influence son dimensionnement, afin que, pour des raisons d'économies d'énergie, il réponde le plus fidèlement à ces conditions de navigation. Dans le passé, cette question n'était pas forcément abordée et les moteurs étaient souvent surdimensionnés. Or, le surdimensionnement d'un moteur entraîne des dépenses énergétiques plus importantes qu'un moteur correctement dimensionné (entre 60 % et 100 % de sa charge nominale). Tout comme le sous-dimensionnement, le surdimensionnement d'un moteur réduit la durée de vie de celui-ci.

Il s'agit donc d'avoir des pilotines équipées de moteurs dimensionnés au plus juste par rapport aux besoins. Une marge de sécurité, un léger surdimensionnement, reste acceptable.

Cette action permet un gain énergétique mais également économique puisque le moteur nécessite moins de ressources pour fonctionner.

2. Domaine de pertinence

Cette action est applicable à l'ensemble des pilotines à moteur.

3. Solutions associées

Une seule solution associée : le dimensionnement du moteur.

4. Contexte et réglementation

Les pilotines sont des navires de petite taille capables de se déplacer à grande vitesse. Affectées à une station de pilotage, elles couvrent une zone maritime autour du port qu'elles desservent. Chaque pilotine navigue donc dans des zones spécifiques, aux conditions de navigation propres et variables dans le temps.

Le règlement local s'appliquant à chaque station de pilotage précise le nombre de pilotines que ces dernières doivent posséder¹. En revanche, aucune caractéristique de motorisation n'est précisée. Il s'agit d'un choix à faire en fonction des besoins estimés par la collectivité des pilotes, la station de pilotage et le syndicat de pilotes. Ainsi la réglementation n'encadre pas les caractéristiques des moteurs de pilotine.

¹ Exemple du règlement local pour la station de pilotage du Havre – Fécamp : <https://www.prefectures-regions.gouv.fr/normandie/content/download/76439/494068/file/recueil-r28-2020-145-recueil-des-actes-administratifs-special.pdf>

Solution 1 : Dimensionnement du moteur

1. Principes

Il s'agit de dimensionner le moteur des pilotines au plus juste, c'est-à-dire pour qu'ils soient le plus adaptés aux conditions de navigation rencontrées par les pilotines.

Pour y parvenir, il est nécessaire que les technologies soient suffisamment développées, ce qui est le cas pour ce type de vedettes. De plus, il est aussi recommandé d'avoir une bonne connaissance des besoins de l'embarcation. Ces derniers varient fortement selon les conditions de houle, de courant, de vent mais également selon le chargement de la vedette, sa vitesse de déplacement et les caractéristiques de la pilotine. Une étude approfondie permettant d'identifier les différents cycles énergétiques² auxquels le moteur est soumis semble nécessaire pour déterminer les critères principaux de sélection d'un moteur tels-que la puissance nominale requise par exemple.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

L'efficacité optimale d'un moteur est obtenue lorsque celui-ci fonctionne entre 60 et 100 % de sa charge nominale. Lorsque le moteur est surdimensionné, il fonctionne généralement à moins de 60 % de sa charge nominale ce qui réduit le rendement, entraînant une plus grande perte d'énergie sous forme de chaleur.

Le gain énergétique dépend in fine de plusieurs paramètres :

- L'écart de puissance entre le moteur surdimensionné et le moteur adapté ;
- La résistance à l'eau et au vent de la pilotine ;
- Les conditions de navigation (houle, courant, vent) ;
- La vitesse moyenne de déplacement de la pilotine ;
- Le poids de la pilotine chargée.

Les gains énergétiques d'un juste dimensionnement d'un moteur peuvent être conséquents si le moteur initial était fortement surdimensionné.

Le gain attendu devra néanmoins être estimé au cas par cas en fonction du surdimensionnement initial mais aussi en prenant en compte la résistance à l'eau et au vent de la pilotine et en fixant les conditions de navigation moyennes ainsi que sa-vitesse de déplacement moyenne et son-poids.

Le gain en termes de réduction des émissions des GES sera identique au gain énergétique.

3. Domaine de pertinence

Cette action est applicable à l'ensemble des pilotines à moteur lors de la partie conception/dimensionnement.

4. Mise en œuvre

En amont du renouvellement d'un matériel, il est nécessaire de faire le point sur les conditions de navigation dans lesquelles le nouveau matériel sera amené à évoluer. Cette connaissance permet de choisir un modèle dont le moteur est dimensionné en fonction de la zone sur laquelle il se déplacera. Pour acquérir cette connaissance, des instruments de mesure peuvent être embarqués et un tableau de suivi peut être créé et alimenté régulièrement.

² <https://www.akajoule.com/decarbonation-du-bateau-pilote/>

Par la suite, un nouveau modèle peut être acheté, neuf ou d'occasion, avec une motorisation adaptée. L'ancien modèle peut être vendu d'occasion.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

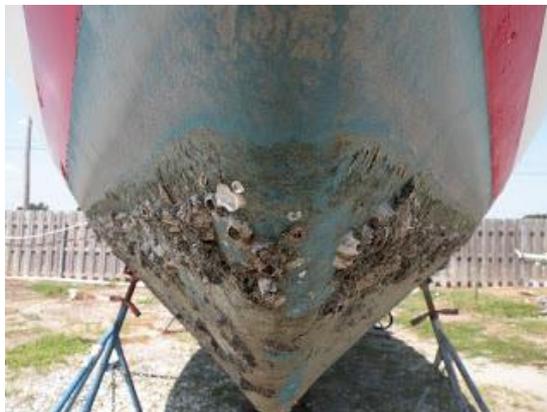
- Nombre de pilotines renouvelées en dimensionnant leur puissance.

A1 FA 2 : Carénage de la pilotine

Synthèse

1. Description de l'action

Une des problématiques auxquelles tout navire doit faire face est le phénomène de « fouling » (encrassement en français). L'océan est rempli d'organismes (algues, coquillages) qui s'attachent à la partie immergée des navires. Ce phénomène réduit grandement les performances hydrodynamiques car il augmente la traînée des navires (plus de frottements dans l'eau). Il abîme aussi la coque et son entretien devient nécessaire³.



Source : Antifouling (ITA Yachts Canada)

Le carénage est donc une révision de la coque du navire qui permet d'améliorer ses qualités nautiques (vitesse et manœuvrabilité) et par conséquent ses consommations. L'objectif de cette action est de proposer des carénages réguliers pour optimiser le fonctionnement des pilotines.

2. Domaine de pertinence

Le carénage n'est pas seulement pertinent mais nécessaire à l'entretien de toutes les flottes de pilotines.

3. Solutions associées

Une seule solution associée : le carénage de la pilotine.

4. Contexte et réglementation

La réglementation encadre le carénage afin de préserver la qualité de l'eau et des milieux aquatiques. L'utilisation d'installations adaptées est obligatoire. Ces dernières évitent les rejets en mer et suivent les articles de loi suivant :

- L216-6 du Code de l'Environnement ;

³ [Carenage de bateau - Nautisme Pratique \(nautisme-pratique.com\)](http://nautisme-pratique.com)

- L2132-3 du Code Général de la Propriété des Personnes Publiques ;
- L5335-2 du Code des transports ;
- Article 90 du Règlement Sanitaire Départemental.

De plus, l'utilisation de peintures anti-salissures est limitée par un règlement européen (règlement n°528/2012 du Parlement européen) à la mise sur le marché de produits biocides non toxiques pour l'homme et l'environnement.

Solution 1 : Carénage

1. Principes

Le carénage est la série d'opérations de révision périodique de la coque d'un navire en vue de lui redonner ses qualités nautiques (vitesse, manœuvrabilité) en minimisant la résistance de la coque dans l'eau.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Le carénage vient contrer le phénomène de fouling et donc contrer les pertes associées à celui-ci. Le fouling augmente la force de traînée (la friction avec l'eau), ce qui réduit l'hydrodynamisme des navires (cette force de traînée dépend de la surface de référence et de la vitesse du fluide).

Ainsi, plus la vitesse est élevée, plus la résistance sera forte. Il est important de remédier au problème puisque les pilotines évoluent souvent à des vitesses élevées. 1 à 2 mm d'algues et autres organismes fixés sur une coque causent une perte de vitesse de 15 %⁴.

Une coque fortement attaquée peut augmenter la consommation de carburant de près de 40 %.

En première approximation, une hypothèse de gain moyen de 20 % pourra être retenue.

Le gain en termes de réduction des émissions des GES sera identique au gain énergétique.

3. Domaine de pertinence

Le carénage est pertinent pour toutes les flottes de pilotines.

4. Mise en œuvre

Cette opération est à réaliser sur une aire de carénage.

Le navire est mis hors d'eau puis différentes tâches sont effectuées sur la coque :

- Nettoyage ;
- Gommage ;
- Ponçage ;
- Décapage ;
- Eventuellement, grattage des restes de peinture ;
- Eventuellement, réparation de la carène ;
- Remise en peinture.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi :

- Nombre de pilotines ayant bénéficié d'un carénage au cours des 2 dernières années.

Modalités pratiques :

- Mise en place et exploitation d'un fichier de suivi de la flotte.

⁴ <https://nautisme-pratique.com/5-raisons-carenage-tous-les-ans/>

Axe 2 : Mode de propulsion

A2 FA 1 : Electrique	20
Solution 1 : 100 % électrique.....	22
A2 FA 2 : Hydrogène	24
Solution 1 : 100 % hydrogène.....	26
A2 FA 3 :GNV	29
Solution 1 : 100 % GNV.....	31
Solution 2 : Hybride GNV-diesel	34
Solution 3 : Hybride GNV-Hydrogène.....	37
A2 FA 4 : Biocarburants	39
Solution 2 : HVO	43
A2 FA 5 : Collecte et analyse des informations	45
Solution 1 : Economètre.....	47

A2 FA 1 : Electricité

Synthèse

1. Description de l'action

La majorité des pilotines fonctionne actuellement au diesel. Dans une volonté de réduction de l'impact environnemental, plusieurs alternatives se développent pour limiter le recours à cette énergie fossile. C'est par exemple le cas avec l'utilisation de dispositifs 100 % électrique ou hybride (diesel-électrique).

Peu émettrice au moment de son utilisation, la question de la provenance de l'électricité est toutefois à prendre en compte. Produite à partir de charbon, son impact environnemental reste important⁵. En France, l'origine de l'électricité est majoritairement nucléaire ou renouvelable⁶, son impact environnemental est donc faible.

Le choix du mode de propulsion s'effectue au moment de l'achat du navire. Un retrofit peut aussi être envisagé.

2. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des pilotines qui utilisent une motorisation thermique.

Elles nécessitent que les stations de pilotage soient équipées de bornes de recharge à quai ou de systèmes embarqués de recharge (panneaux solaires par exemple).

3. Solutions associées

Une seule solution associée : le 100% électrique, c'est-à-dire une pilotine équipée d'un système de propulsion électrique complet (batteries, système électronique et moteur).

L'hybridation électrique n'est pas pertinente pour les pilotines qui sont des navires rapides à carènes planantes. Cela ajoute du poids qui vient grever le rendement et les performances. Les solutions d'hybridation série et parallèle ne sont donc pas retenues dans le présent guide.

4. Contexte et réglementation

La motorisation électrique se développe dans le transport maritime. Des expérimentations sont en cours. En avril 2022, la 1^{ère} pilotine 100 % électrique a été inaugurée dans le port de Sète⁷.

La technologie est ainsi en pleine évolution et les possibilités se multiplient pour électrifier les navires.

A ce jour, il n'existe pas de texte encadrant la motorisation électrique des navires.

⁵ <https://fr.eni.com/particuliers/comprendre-energie/energie-expliquee/electricite-charbon>

⁶ <https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-delectricite-par-filiere>

⁷ <https://marine-oceans.com/innovation/mgh-inaugure-la-premiere-pilotine-100-electrique/>

En revanche, l'Union européenne travaille actuellement sur le paquet législatif « Ajustement à l'objectif » (réduire de 55 % les émissions de l'UE d'ici 2030). Plus spécifiquement, l'UE a adopté le 23 juillet 2023 un règlement relatif à l'initiative FuelEU Maritime qui vise à réduire l'empreinte carbone du secteur maritime dans l'UE grâce à un recours accru aux carburants renouvelables et bas carbone⁸. Parmi les objectifs de l'initiative, l'un précise de réduire jusqu'à 80 % l'intensité des émissions de GES de l'énergie utilisée à bord des navires d'ici à 2050⁹. Ce texte devrait encourager les acteurs du secteur à modifier le mode de propulsion de leurs navires, dont les pilotines, en utilisant notamment l'électricité.

De plus, certains grands ports maritimes sont soumis à l'obligation de réalisation de leur bilan des émissions de gaz à effet de serre (BEGES) depuis 2019¹⁰. Le changement de mode de propulsion peut permettre de diminuer les émissions constatées.

⁸ <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2023/07/25/fueleu-maritime-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-maritime-sector/>

⁹ Règlement européen (publié à l'automne 2023) : <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-26-2023-INIT/fr/pdf>

¹⁰ https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000039369665

Solution 1 : 100 % électrique

1. Principes

Un navire électrique est mu par un moteur électrique, alimenté sous forme de tension électrique par des batteries, qui sont rechargées via des dispositifs embarqués (panneaux solaires par exemple) et/ou via des stations de recharges sur les quais.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Une motorisation électrique permet d'optimiser la propulsion, à travers le contrôle de puissance et le suivi des données.

S'il n'existe pas de données générales sur les gains énergétiques d'un passage d'une motorisation diesel à une motorisation 100 % électrique, il est néanmoins possible de l'estimer.

Sur la base d'un rendement moyen d'un moteur diesel moderne estimé à 30 %, comparé à un rendement moyen d'un moteur électrique continu compris entre 70 et 85 %, le passage à du 100 % électrique permet en théorie un gain énergétique compris entre 57 et 65 %.

A noter que cette amélioration est à nuancer avec l'autonomie des batteries. Un réservoir de 100 L de diesel permet plusieurs heures de fonctionnement à régime maximal. La pilotine 100 % électrique du port de Sète¹¹ arrive à réaliser 2 à 3 sorties consécutives sans recharger ses batteries, et une fois nécessaire, la charge prend 30 min à 1h30¹².

Bien qu'elle n'engendre aucune consommation directe de carburant fossile, l'utilisation d'un navire électrique nécessite une production d'électricité elle-même à l'origine d'émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, compte tenu du « mix énergétique » de la production française d'électricité, on estime que la réduction des émissions de GES en France métropolitaine par rapport à un engin similaire fonctionnant au MDO est de 84 %. En effet, selon la base Empreinte de l'ADEME¹³, 1 kWh d'électricité du mix français émet 0,0513 kg CO₂e tandis qu'un litre de MDO émet 0,330 kg CO₂e/kWh.

Type véhicule	Gains énergétiques liés à cette solution (% de réduction de la consommation)	Gains GES liés à cette solution (% de réduction des émissions de GES)
Pilotine	57 à 65 %	84 %

Cette solution permet également de limiter les nuisances sonores liées au moteur du navire et de supprimer les émissions de polluants atmosphériques lors de la phase d'utilisation du navire.

¹¹ La e-Maguelonne, inaugurée en avril 2022, a bénéficié d'un retrofit de son moteur thermique. La pilotine a une autonomie de 1h30 avec 186 kWh de batteries, soit environ 1 800 kg. A service rendu équivalent, on peut estimer de cela correspond à la consommation de ~40 L de gas-oil.

¹² <https://marine-oceans.com/innovation/mgh-inaugure-la-premiere-pilotine-100-electrique/>

¹³ <https://base-empreinte.ademe.fr/donnees/jeu-donnees>, Electricité/2022 - usage : Transports/consommation, méthode moyenne et MDO usage maritime et fluvial

3. Domaine de pertinence

Le navire 100 % électrique est pertinent pour les pilotines puisqu'elles réalisent de courtes distances. Deux points d'attention sont toutefois à soulever :

- Un dispositif de rechargement, embarqué ou à quai, est nécessaire ;
- Le temps nécessaire de recharge doit être pris en compte : il s'agit d'un facteur limitant en cas de forte affluence de navires à assister.

4. Mise en œuvre

Que ce soit pour l'achat d'un navire neuf et/ou pour le retrofit d'un navire existant (permettant une économie de ressources et une plus forte réduction des émissions de GES dans une analyse plus globale en cycle de vie), il est fortement préconisé de réaliser une étude de faisabilité technico-économique avant la mise en place de cette solution, intégrant notamment les contextes d'utilisation des pilotines, afin de dimensionner le dispositif le plus adapté aux usages du navire (optimisation du rendement).

L'investissement à réaliser pour l'achat d'un navire à propulsion 100 % électrique est plus important que pour le diesel, la technologie étant encore en cours de développement.

Néanmoins, le coût de fonctionnement est plus faible, du fait d'une meilleure efficacité énergétique, d'un coût de l'énergie beaucoup plus faible (0,227 €/kWh mécaniques pour l'électricité contre 0,55 €/kWh mécaniques pour le diesel). De plus, les charges d'entretien et de maintenance sont plus faibles pour un moteur électrique comparé à un moteur diesel.

Par ailleurs, il faut également prévoir des bornes de rechargement à quai, si aucun dispositif embarqué n'est prévu.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre de pilotines 100 % électriques (en absolu et en relatif) ;
- Nombre de mises à bord de pilotes effectuées par ces pilotines 100 % électriques (en absolu et en relatif) ;
- Milles nautiques (en absolu et en relatif) parcourus par les pilotines 100 % électriques ;
- Nombre d'heures de fonctionnement (en absolu et en relatif) des pilotines 100 % électriques ;
- Consommation d'électricité correspondante.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploitation du fichier de suivi de la flotte ;
- Suivi de la consommation énergétique des pilotines.

A2 FA 2 : Hydrogène

Synthèse

1. Description de l'action

La majorité des pilotines fonctionne actuellement au diesel. Dans une volonté de réduction de l'impact environnemental, plusieurs alternatives se développent pour limiter le recours à cette énergie fossile. C'est par exemple le cas avec l'utilisation de dispositifs 100 % hydrogène ou hybride (diesel-hydrogène).

Un navire à hydrogène est un navire dont le carburant utilisé pour son fonctionnement est l'hydrogène, qui peut être consommé de deux manières :

- Directe : utilisation d'un moteur thermique à explosion directement alimenté en hydrogène (sous forme de gaz) ;
- Indirecte : utilisation d'un moteur électrique alimenté en électricité par batterie, elle-même alimentée par une Pile à Combustible (PAC) à hydrogène. La PAC est un dispositif électrochimique dans lequel l'hydrogène et l'oxygène gazeux se combinent pour fournir de l'électricité, de l'eau et de la chaleur suivant un processus inverse de celui de l'électrolyse. Ce dispositif implique un approvisionnement en dihydrogène (H₂) à l'état gazeux via l'utilisation de bouteilles, faisant office de réservoir dans la salle des machines.

L'essentiel de la R&D et des navires à hydrogène en fonctionnement porte sur une utilisation indirecte de l'hydrogène.

Le développement d'une flotte fonctionnant à l'hydrogène requiert :

- D'une part des navires adaptés, équipés d'un dispositif de stockage d'hydrogène spécifique ;
- D'autre part un système spécifique de recharge, qui peut se faire via :
 - o Une station à quai ;
 - o Un échange du module de stockage (« swaping ») ;
 - o Un avitaillement par navire.

2. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des pilotines disposant d'un approvisionnement pérenne en hydrogène.

La motorisation hydrogène peut être appliquée à des navires neufs, mais également aux navires disposant d'un ou plusieurs moteurs électriques (l'ajout d'une PAC permet d'alimenter les moteurs électriques).

3. Solutions associées

Une seule solution associée : la motorisation 100 % hydrogène avec un moteur électrique alimenté par une PAC fonctionnant avec de l'hydrogène ;

L'hybridation diesel-électrique, qui repose sur l'utilisation de deux moteurs, montés en parallèle, reliés à la transmission (les deux moteurs servent à la propulsion), à savoir un moteur thermique et un moteur électrique alimenté par une PAC, n'est pas pertinente dans le cas des pilotines (ajout de poids sur des navires rapides à carènes planantes, qui vient grever le rendement et les performances).

4. Contexte et réglementation

Le développement de la technologie à hydrogène est en cours. Elle s'appuie notamment sur les objectifs affichés par les instances internationales et nationales telles que ceux de l'initiative FuelEU Maritime du paquet législatif « Ajustement à l'objectif 55 ». En effet, l'UE a adopté le 23 juillet 2023 un règlement relatif à l'initiative FuelEU Maritime qui vise à réduire l'empreinte carbone du secteur maritime dans l'UE grâce à un recours accru aux carburants renouvelables et bas carbone¹⁴. Parmi les objectifs de l'initiative, l'un précise de réduire jusqu'à 80 % l'intensité des émissions de GES de l'énergie utilisée à bord des navires d'ici à 2050¹⁵.

La réglementation évolue avec l'essor de la technologie. Actuellement, les navires à hydrogène doivent impérativement être homologués auprès des autorités compétentes (Ministère de la Transition écologique et de la cohésion des territoires) avant leur utilisation, ce qui implique de réaliser des tests et des études de risques.

L'ensemble des composants en contact avec l'hydrogène doivent respecter des normes et des certifications spécifiques. Les équipements hydrogène sous pression (réservoir, détendeurs, etc.) doivent par exemple être certifiés EC79.

Les zones de stockage et d'utilisation de l'hydrogène doivent être dimensionnées selon les recommandations du DNV-GL ou du Bureau Veritas afin d'éviter les points d'accumulation du gaz. Une étude ATEX doit permettre de définir les zones sensibles et les équipements associés sur chaque configuration.

¹⁴ <https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2023/07/25/fueleu-maritime-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-maritime-sector/>

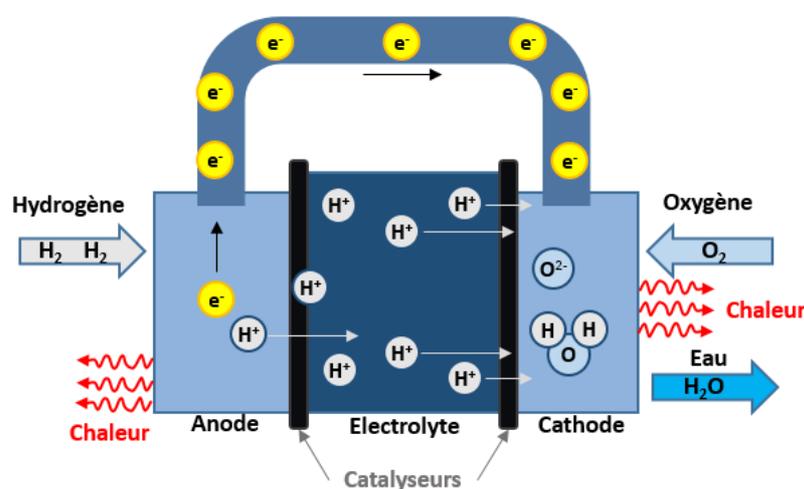
¹⁵ Règlement européen (publié à l'automne 2023) : <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-26-2023-INIT/fr/pdf>

Solution 1 : 100 % hydrogène

1. Principes

Un navire à PAC hydrogène est mu par un moteur électrique alimenté par une batterie, elle-même alimentée par une PAC. Ce type de dispositifs présente l'avantage de réduire fortement les émissions de polluants lors de leur utilisation.

La PAC est un dispositif électrochimique dans lequel l'hydrogène et l'oxygène gazeux se combinent pour fournir de l'électricité, de l'eau et de la chaleur suivant un processus inverse de celui de l'électrolyse. Ce dispositif implique un approvisionnement en dihydrogène (H_2) à l'état gazeux via l'utilisation de bouteilles, faisant office de réservoir dans la salle des machines.



Source : Fonctionnement d'une pile à combustible (H_2Sys)

Il existe plusieurs types de PAC :

- PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, membrane polymère) : ce type de PAC présente l'avantage d'être compacte et aujourd'hui largement développée dans l'industrie (automobile notamment). Néanmoins, elle ne peut être alimentée que par de l'hydrogène très pur, et consomme du platine ;
- SOFC (Solid Oxide Fuel Cell, membrane céramique) : ce type de PAC peut être alimentée par de l'hydrogène (et/ou du gaz naturel) et peut être utilisée en cogénération grâce à ses hautes températures de fonctionnement (900 °C). Néanmoins, la montée en température demande du temps à cause de sa forte inertie (et le dispositif rejette du CO_2 proportionnellement à l'utilisation éventuelle de gaz naturel).

La recherche et le développement sont en plein essor sur le sujet. Les projets se multiplient et des expérimentations sont lancées¹⁶.

Le développement d'une flotte fonctionnant à l'hydrogène requiert :

- D'une part des navires adaptés, équipés d'un dispositif de stockage d'hydrogène spécifique ;
- D'autre part un système spécifique de recharge, qui peut se faire via :
 - o Une station à quai ;
 - o Un échange du module de stockage (« swapping ») ;
 - o Un avitaillement par navire.

¹⁶ <https://www.h2-mobile.fr/actus/bateau-hydrogene/>

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Une motorisation à hydrogène permet d'optimiser la propulsion, à travers le contrôle de puissance et le suivi des données permis par l'utilisation d'un moteur électrique.

L'utilisation d'1 kg d'hydrogène dans une PAC alimentant un moteur électrique, c'est-à-dire l'équivalent de 33,6 KWh, permet de produire autant de force mécanique que 4,5 L de diesel consommés dans un moteur thermique (48,3 KWh).

Sur cette base, on estime que le dispositif PAC-moteur électrique est 30 % plus efficace énergétiquement qu'une propulsion diesel (dans le cas d'une alimentation de la PAC 100 % hydrogène).

Quant au bilan environnemental global de la mobilité hydrogène, « du puits à la roue », il est complexe et va dépendre principalement¹⁷ de la nature de la source primaire (renouvelable versus fossile) et de la distance d'acheminement entre la production de l'hydrogène et la station de recharge.

Une mobilité alimentée par hydrogène produit par vaporeformage du gaz naturel ou par électrolyse du mix UE sera forcément plus émettrice de GES qu'une mobilité à base d'hydrogène vert. Il est par conséquent primordial de s'assurer de la nature de la source primaire et du pays de production d'hydrogène pour atteindre un bilan environnemental positif pour la mobilité hydrogène.

Ainsi le gain GES ne pourra être estimé que d'après le processus de production/distribution de l'hydrogène.

Type véhicule	Gains énergétiques liés à cette solution (% de réduction de la consommation)	Gains GES liés à cette solution (% de réduction des émissions de GES)
Pilotine	30 %	Variable

3. Domaine de pertinence

A ce jour, ce sont essentiellement des navires de petite taille qui sont aujourd'hui en fonctionnement ou en expérimentation, utilisés pour le transport de personnes^{18 19}.

La solution est pertinente pour les pilotines : la technologie semble développer la puissance nécessaire à leur-bon fonctionnement.

Une source d'approvisionnement pérenne est indispensable pour envisager l'achat d'un navire à hydrogène.

4. Mise en œuvre

Il faut garder en tête que l'hydrogène est une solution à moyen voire long terme car cette technologie n'est pas encore mature et les coûts d'investissement et d'adaptation des infrastructures sont conséquents.

L'offre commerciale de navires à PAC hydrogène est peu développée : sauf pour de rares exceptions, les dispositifs en fonctionnement sont des expérimentations, avec à noter une montée en puissance

¹⁷ D'autres étapes de la chaîne de production/distribution sont également énergivores comme la compression du gaz à haute pression.

¹⁸ <https://www.hynova-yachts.fr/hynova-40/the-new-era/>

¹⁹ <https://www.h2-mobile.fr/actus/premier-ferry-hydrogene-liquide-monde-entre-service/>

année après année. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs et/ou des motoristes pour échanger avec eux sur les coûts et bénéfices de leurs navires.

De même, du fait du caractère peu mature de ces dispositifs, il est préconisé de réaliser une étude de faisabilité technico-économique avant la mise en place de ce type de solutions, intégrant notamment les contextes d'utilisation du navire à hydrogène.

Investissement : La faible maturité de cette technologie engendre un important surcoût d'investissement, essentiellement lié aux frais de développement de la technologie et à la réalisation d'étude préalable et à l'homologation (procédés et démarches de certifications et essais).

A noter que les investissements ne prennent pas en compte les infrastructures de production et de distribution de l'hydrogène, qui sont aujourd'hui peu développées, et qui relèvent d'investissements d'autres acteurs que les stations de pilotage.

Tarif d'achat de l'hydrogène : Le développement de la production, qui devrait monter en puissance au fil des ans, va a priori permettre de faire baisser le prix de l'hydrogène.

Charges de maintenance : Les retours d'expériences (tous types de transports confondus) montrent qu'à puissance équivalente, un moteur électrique alimenté par une PAC est un système qui demande des frais de maintenance inférieurs aux moteurs diesels. En effet, les PAC et les moteurs électriques sont des dispositifs fiables et robustes, qui demandent beaucoup moins de maintenance et d'entretien que les moteurs thermiques²⁰.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre de pilotines 100 % hydrogène (en absolu et en relatif) ;
- Nombre de mises à bord de pilotes effectuées par ces pilotines 100 % hydrogène (en absolu et en relatif) ;
- Milles nautiques (en absolu et en relatif) parcourus par ces pilotines 100 % hydrogène ;
- Nombre d'heures de fonctionnement (en absolu et en relatif) des pilotines 100 % hydrogène ;
- Consommation énergétique correspondante.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploitation du fichier de suivi de la flotte ;
- Suivi de la consommation énergétique des pilotines.

²⁰ Ces frais de maintenance vont dépendre du nombre d'heures de marche du moteur, dont la durée de vie peut être estimée à 10 000 h au pilotage. Un moteur de 350 kW coûte actuellement environ 35 k€, sachant qu'il en faut deux sur une pilotine moyenne.

A2 FA 3 : GNV

Synthèse

1. Description de l'action

Le Gaz Naturel pour Véhicule (GNV) est composé de plus de 85 % de méthane, de 2 à 8 % d'éthane et d'une faible quantité d'autres hydrocarbures (propane, butane). Plus léger que l'air, le GNV se dissipe rapidement en cas de fuite, contrairement aux autres carburants. Il est stocké et utilisé sous forme gazeuse ou liquide et sa distribution se généralise.

On parle de GNV bateau lorsque ce gaz est utilisé pour alimenter les bateaux.

Dans la cadre de l'alimentation des navires, il est principalement utilisé sous les formes suivantes :

- Le Gaz Naturel Liquéfié (GNL) : mis sous forme liquide par refroidissement (-162°C à 1 bar jusqu'à -130°C à 10 bars), le GNL occupe environ deux fois le volume du gazole à énergie produite identique. Il est transporté, notamment au moyen de navires méthaniers vers des terminaux méthaniers ;
- Le Gaz Naturel Compressé (GNC) : mis sous pression (200 bars), le GNC occupe deux à trois fois le volume du GNL à énergie produite identique. Il est prélevé du réseau du gaz de ville, puis compressé et stocké dans une station d'avitaillement ;
- Gas-to-Liquid (GTL) : mis sous forme liquide par le procédé chimique Fischer-Tropsch, à température ambiante.

Le bioGNV est obtenu grâce à la méthanisation de déchets organiques, qui peut ensuite être utilisé sous forme compressée (bioGNC) ou liquide (bioGNL).

2. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des navires disposant d'un approvisionnement pérenne en GNV.

La motorisation GNV peut être appliquée à des navires neufs.

3. Solutions associées

Quatre alternatives GNV aux moteurs diesel existent et dépendent des infrastructures du réseau :

- La motorisation 100 % GNV, qui repose sur l'utilisation d'un ou de plusieurs moteurs thermiques exclusivement alimentés en gaz naturel (GNC, GNL ou GTL) ;
- La motorisation GNV hybride dual-fuel (GNV – diesel), qui repose sur l'utilisation d'un ou de plusieurs moteurs thermiques pouvant être alimenté par un mélange de gaz naturel (GNC, GNL ou GTL) et de diesel ;
- La motorisation GNV hybride dual-fuel (GNV – Hydrogène), qui repose sur l'utilisation d'un ou de plusieurs moteurs électriques pouvant être alimenté par un mélange de gaz naturel (GNC, GNL ou GTL) et d'hydrogène ;
- La motorisation GNV – électrique, qui repose sur l'utilisation d'un ou de plusieurs moteurs électriques alimentés par du gaz naturel (GNC, GNL ou GTL) via l'utilisation de générateurs gaz-électrique : cette solution étant aujourd'hui très peu développée, elle n'est pas décrite plus en avant.

4. Contexte et réglementation

L'Organisation maritime internationale (OMI) fixe des objectifs ambitieux²¹ pour réduire les émissions de GES du secteur maritime d'ici 2050.

Le bioGNL, qui peut être mélangé au GNL fossile, peut permettre de répondre à ces objectifs²², en quantités relativement faibles pour atteindre les objectifs de 2030 de l'OMI, puis par augmentation de la proportion de biocarburant dans le mélange pour ceux de 2050.

En outre, la directive 2014/94/UE (directive DAFI) indique que chaque port maritime doit disposer à l'horizon 2026 d'un nombre suffisant de points de ravitaillement de ravitaillement en GNL, en mer ou à terre, fixe ou mobile.

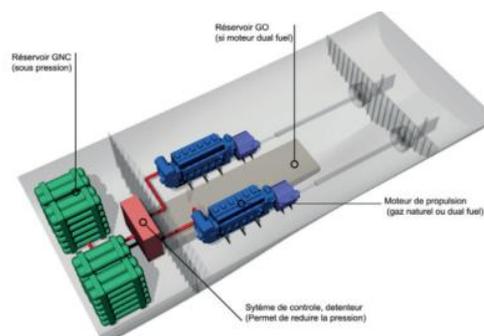
²¹ <https://www.imo.org/fr/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx>

²² Rapport SEA-LNG : https://www.gaz-mobilite.fr/docs/upload/doc_20221021112448.pdf

Solution 1 : 100 % GNV

1. Principes

Les navires 100 % GNV (GNC, GNL ou bioGNV) fonctionnent avec un moteur à allumage (similaire à celui d'un moteur essence). Ce type de moteur, qui fonctionne exclusivement avec du gaz naturel, est simple à produire pour un motoriste du fait de sa base technique très proche des moteurs diesel.



Fonctionnement d'un bateau 100 % GNC, dans le cas de l'utilisation d'un moteur 100 % gaz naturel (source : Lebéfaude Solutions Navales)

Les contraintes de stockage ne sont pas les mêmes selon le type de GNV utilisé :

- GNC : il se stocke dans des réservoirs sous pression à 200 bars, avec peu de contraintes techniques (aucun risque cryogénique et avitaillement simple), et l'utilisation de composants courants pour la fabrication des réservoirs ;
- GNL : la réglementation applicable préconise un stockage dans des réservoirs indépendants cryogéniques de « type C » à $-162^{\circ}\text{C}/1$ bar jusqu'à $-130^{\circ}\text{C}/10$ bars maximum. Il s'agit de réservoirs indépendants, fermés et cylindriques dont l'intégration à l'intérieur du navire est plus contraignante que pour les réservoirs de GNC. Le phénomène de « boil-off » (évaporation partielle progressive du GNL dans le réservoir) implique la mise en place d'un dispositif d'évacuation ou d'utilisation de ce gaz pour maintenir la pression de service du réservoir ;
- GTL : les contraintes sont moindres puisqu'il se stocke à température ambiante, comme le diesel.

Le développement d'une flotte fonctionnant au GNV requiert :

- D'une part, des navires adaptés, équipés d'un dispositif de stockage spécifique ;
- D'autre part, des solutions d'avitaillement :
 - o « Truck to Ship » : avitaillement du navire à quai, depuis un camion-citerne. Cette solution fonctionne sans infrastructures lourdes, ce qui permet une mise en œuvre à moindre coût. A noter que cet avitaillement doit néanmoins faire l'objet d'études particulières du site, en fonction des risques ;
 - o « Ship to Ship » : avitaillement depuis un navire avitailleur ;
 - o « Land to Ship » : avitaillement depuis une station de compression/stockage située à terre.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Les moteurs à allumages ont un rendement inférieur aux moteurs diesel : de l'ordre de 30 % à 35 % pour le moteur à allumage contre 40 à 45 % en moyenne pour les moteurs diesel²³. Cela est

²³ Moteur à allumage commandé — Wikipédia (wikipedia.org)

principalement dû à des taux de compression plus faible. Ce rendement inférieur entraîne une consommation d'énergie d'environ 22 % plus importante pour un véhicule GNV par rapport à un véhicule diesel.

Concernant l'impact sur les émissions de GES, le gain peut atteindre 20 % par rapport au diesel²⁴ lorsque que le gaz naturel utilisé est d'origine fossile (pour le GNC). Ce gain peut atteindre les 80 % en cas d'utilisation de bioGNV.

Pour le GNL, la feuille de route de décarbonation de la filière maritime²⁵ présente une réduction des émissions de CO₂ jusqu'à 17 % selon le type de motorisation et l'origine du GNL (de -6 % à 17 % dans le projet de règlement FuelEU), sans compter les fuites fugitives de méthane pouvant amener à une augmentation jusqu'à 6 % des émissions de GES (par rapport au fuel lourd d'après FuelEU). En combinant avec des études sur le transport routier qui montrent que les réductions d'émissions de GES ne s'élèvent pas à plus de 6 % (de 2,6 à 5,6 %), un gain moyen de 3 % est retenu en première approximation.

Par rapport au diesel, le GNV permet de réduire les émissions d'oxydes d'azote (NOx) de 30 % à 70 %, les particules fines de 90 %.

Type véhicule	Gains énergétiques * liés à cette solution (% de réduction de la consommation)	Gains GES liés à cette solution (% de réduction des émissions de GES)	
		GNV	bioGNV
Pilotine	-22 %	3 à 20 %	80 %

* Les gains négatifs correspondent à une surconsommation.

3. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des navires neufs.

4. Mise en œuvre

L'offre commerciale de navires 100 % GNV est peu développée, avec a priori très peu de navires de ce type en France. Il est conseillé de se rapprocher des constructeurs et/ou des motoristes pour échanger avec eux sur la disponibilité de l'offre.

Dans le cas d'un retrofit, il est préconisé de réaliser une étude de faisabilité technico-économique avant la mise en place de ce type de solutions, notamment pour réfléchir à l'implantation du dispositif dans le navire.

On estime qu'un moteur GNL engendre un surcoût à l'investissement de 10 % par rapport à un moteur diesel. Ce surcoût s'élève à hauteur de 30 % au global si on intègre également le dispositif d'alimentation du moteur.

Par ailleurs, ce type de moteur engendre des coûts de maintenance et d'entretien moins importants que pour les moteurs diesel.

Concernant le coût du carburant, il est difficilement appréciable pour être mis en comparaison, vu la volatilité des prix des différentes énergies.

²⁴ <https://www.vnf.fr/vnf/brochure-et-lettress/les-cahiers-techniques-de-batelia-propulsion-gaz-pour-bateaux-fluviaux/>

²⁵ [https://www.mer.gouv.fr/sites/default/files/2023-](https://www.mer.gouv.fr/sites/default/files/2023-04/23059_Feuille%20de%20route%20de%20carbonation_compressed.pdf)

04/23059_Feuille%20de%20route%20de%20carbonation_compressed.pdf

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre de pilotines 100 % GNV (en absolu et en relatif), avec répartition par type de GNV) ;
- Nombre de mises à bord de pilotes effectuées par ces pilotines 100 % GNV (en absolu et en relatif) ;
- Milles nautiques (en absolu et en relatif) parcourus par ces pilotines 100 % GNV ;
- Nombre d'heures de fonctionnement (en absolu et en relatif) des pilotines 100 % GNV ;
- Consommation énergétique correspondante.

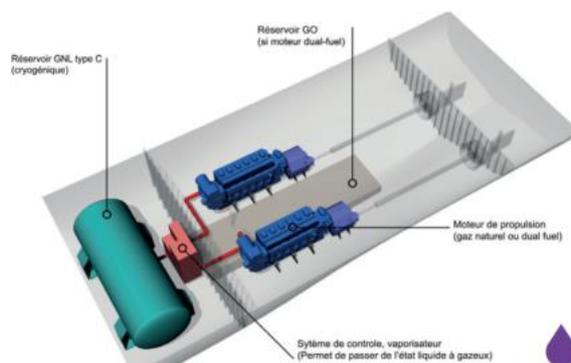
Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploitation du fichier de suivi de la flotte ;
- Suivi de la consommation énergétique des pilotines.

Solution 2 : Hybride GNV-diesel

1. Principes

Les navires GNV hybride dual-fuel sont des technologies bicarburant associant diesel et gaz naturel (GNC, GNL ou GTL). La combinaison du gaz et du diesel assure l'auto-inflammation du mélange : la proportion de gaz varie selon le type d'utilisation (de 0 à 50 % au ralenti en manœuvre et au démarrage, et jusqu'à 90 % en rythme de croisière).



Fonctionnement d'un bateau hybride dual-fuel GNL-diesel (source : Lebéfaude Solutions Navales)

Les contraintes de stockage ne sont pas les mêmes selon le type de GNV utilisé :

- GNC : il se stocke dans des réservoirs sous pression à 200 bars, avec peu de contraintes techniques (aucun risque cryogénique et avitaillement simple), et l'utilisation de composants courants pour la fabrication des réservoirs ;
- GNL : la réglementation applicable préconise un stockage dans des réservoirs indépendants cryogéniques de « type C » à $-162^{\circ}\text{C}/1$ bar jusqu'à $-130^{\circ}\text{C}/10$ bars maximum. Il s'agit de réservoirs indépendants, fermés et cylindriques dont l'intégration à l'intérieur du navire est plus contraignante que pour les réservoirs de GNC. Le phénomène de « boil-off » (évaporation partielle progressive du GNL dans le réservoir) implique la mise en place d'un dispositif d'évacuation ou d'utilisation de ce gaz pour maintenir la pression de service du réservoir ;
- GTL : les contraintes sont moindres puisqu'il se stocke à température ambiante, comme le diesel.

Le développement d'une flotte fonctionnant au GNV requiert :

- D'une part des navires adaptés, équipés d'un dispositif de stockage spécifique ;
- D'autre part des solutions d'avitaillement :
 - « Truck to Ship » : avitaillement du navire à quai, depuis un camion-citerne. Cette solution fonctionne sans infrastructures lourdes, ce qui permet une mise en œuvre à moindre coût. A noter que cet avitaillement doit néanmoins faire l'objet d'études particulières du site, en fonction des risques ;
 - « Ship to Ship » : avitaillement depuis un navire avitailleur ;
 - « Land to Ship » : avitaillement depuis une station de stockage située à terre.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Le gain énergétique des navires dual-fuel GNV-diesel dépend de la part d'utilisation du GNV par rapport au diesel. En effet, les moteurs à allumages (pour le GNV) ont un rendement inférieur aux

moteurs diesel : de l'ordre de 30 à 35 % pour le moteur dual-fuel diesel-GNV²⁶ contre 40 à 45 % en moyenne pour les moteurs diesel²⁷. Cela est principalement dû à des taux de compression plus faibles. Ce rendement inférieur entraîne une consommation maximum d'énergie de l'ordre de 22 % plus importante pour un dual-fuel diesel-GNV par rapport à un diesel (en cas de bascule 100 % sur l'utilisation du gaz).

Concernant l'impact sur les émissions de GES, le gain peut atteindre en théorie 20 % par rapport au diesel²⁸ dans le cas d'une substitution du diesel par du GNV à hauteur de 100 %. En pratique, le moteur dual-fuel diesel-GNV ne peut fonctionner sans un apport de diesel, sur une plage comprise entre 10 % (rythme de croisière) à 100 % (démarrage ou manœuvre). Quant au BioGNV, il permet de réduire les émissions de GES de 80 % par rapport à un véhicule diesel. Le gain d'émission de GES dépend donc directement de la part de diesel dans le mélange qui alimente le moteur.

Pour le GNL, des études montrent que les réductions d'émissions de GES du GNL pour le transport routier ne s'élèvent pas à plus de 6 % (de 2,6 à 5,6 %). Pour cause, le stockage du GNL entre -125°C et -160°C est énergivore et bien que les véhicules au GNL émettent moins de CO₂ à l'échappement en raison de la composition chimique plus favorable du carburant, ils produisent d'autres gaz à effet de serre. En particulier, le fonctionnement des véhicules entraîne des émissions considérables de méthane. Lorsqu'il est libéré dans l'atmosphère sans être brûlé, le méthane est un gaz à effet de serre très puissant²⁹.

Un navire dual-fuel aura donc un gain GES inférieur à un navire 100 % GNV. Celui-ci dépendra de la part d'utilisation de GNV et de diesel.

Le GNV permet également de réduire les émissions d'oxydes d'azote (NOx) de 30 % à 70 % et les particules fines de 90 %. Ces valeurs dépendent donc directement de la part de diesel dans le mélange : plus elle sera faible, plus les émissions d'oxydes d'azote et de particules fines seront réduites.

3. Domaine de pertinence

Les solutions décrites dans cette fiche concernent l'ensemble des navires neufs ainsi que les navires équipés d'un moteur diesel (rétrofit).

4. Mise en œuvre

Les étapes pour l'acquisition d'un navire hybride diesel-GNV sont presque identiques à celle d'un navire 100 % GNV.

L'offre commerciale de navires GNV hybride dual-fuel diesel-électrique est très peu développée pour le transport maritime, avec néanmoins quelques navires en fonctionnement.

²⁶http://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/1415/1/HASSAINE.Hichem%20Alaa%20Eddine_MEDJOUT.Mourad.pdf

²⁷ [Moteur à allumage commandé — Wikipédia \(wikipedia.org\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0_allumage_command%C3%A9)

²⁸ <https://www.vnf.fr/vnf/brochure-et-lettres/les-cahiers-techniques-de-batelia-propulsion-gaz-pour-bateaux-fluviaux/>

²⁹ [Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective \(theicct.org\)](https://www.theicct.org/)



Tanker propulsé par une motorisation dual-fuel diesel-GNV (source : Deen Shipping)

Le développement de ce type de solutions pour le routier pourrait permettre d'engendrer une dynamique similaire pour le secteur maritime.

Dans le cas d'un retrofit d'un navire équipé d'un moteur diesel, il est préconisé de réaliser une étude de faisabilité technico-économique avant la mise en place de ce type de solutions, notamment pour réfléchir à l'implantation du dispositif de stockage dans le navire.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre de pilotines hybride (en absolu et en relatif), avec répartition par type de GNV ;
- Nombre de mises à bord de pilotes effectuées par ces pilotines hybrides (en absolu et en relatif) ;
- Milles nautiques (en absolu et en relatif) parcourus par ces pilotines hybrides ;
- Nombre d'heures de fonctionnement (en absolu et en relatif) des pilotines hybrides ;
- Consommation énergétique correspondante.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploitation du fichier de suivi de la flotte ;
- Suivi de la consommation énergétique des pilotines.

Solution 3 : Hybride GNV-Hydrogène

1. Principes

L'hybridation dual-fuel est également possible en combinant le GNV et l'hydrogène pour alimenter en énergie les moteurs des navires.

L'hybridation peut être rendu possible grâce à un système de piles à combustible. Il est important de savoir que cette solution d'hybridation demande des proportions de GNL supérieures à celle de l'hydrogène.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

La technologie est trop récente pour pouvoir bénéficier de retours d'expérience.

3. Domaine de pertinence

L'installation d'un système hybride GNV-Hydrogène est pertinent pour tout navire diesel. Le manque de maturité de cette solution (offre inexistante) implique que le retour sur investissement ne sera pas atteint (d'autres aspects environnementaux et/ou politiques viendront soutenir ce choix).

4. Mise en œuvre

Les étapes pour l'acquisition d'un navire hybride GNV-hydrogène sont presque identiques à celle d'un navire dual-fuel diesel-GNV.

L'offre commerciale de navires GNV-hybride dual-fuel GNV-hydrogène est encore très peu développée pour le transport maritime. Le premier navire fonctionnant avec cette solution a fait ses débuts à l'été 2023³⁰.



Source : Gaz-Mobilité.fr

Dans le cas du rétrofit d'un navire équipé d'un moteur diesel, il est préconisé de réaliser une étude de faisabilité technico-économique avant la mise en place de ce type de solutions, notamment pour réfléchir à l'implantation du dispositif de stockage dans le navire.

³⁰ Le premier navire de croisière hybride GNL hydrogène sera lancé en 2023 (gaz-mobilite.fr)

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre de pilotines hybride (en absolu et en relatif), avec répartition par type de GNV ;
- Nombre de mises à bord de pilotes effectuées par ces pilotines hybride (en absolu et en relatif) ;
- Milles nautiques (en absolu et en relatif) parcourus par ces pilotines hybrides ;
- Nombre d'heures de fonctionnement (en absolu et en relatif) des pilotines hybrides ;
- Consommation énergétique correspondante.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploitation du fichier de suivi de la flotte ;
- Suivi de la consommation énergétique des pilotines.

A2 FA 4 : Biocarburants

Synthèse

1. Description de l'action

Les biocarburants sont des carburants de substitution obtenus à partir de la biomasse, qui peut être d'origine végétale, animale ou issue de déchets organiques. Ils sont une alternative à l'utilisation de carburants d'origine fossile.

Parmi les différentes catégories de biocarburants existants sur le marché, les acteurs du secteur maritime français s'orientent actuellement vers des biodiesels qui peuvent être classés en 3 types :

- Le **B100** est un carburant composé d'esters méthyliques d'acides gras (EMAG), obtenus à partir d'huiles végétales extraites de plantes oléagineuses (colza ou tournesol par exemple), de graisses animales, d'huiles végétales alimentaires ou de déchets gras. Il contient 100 % d'EMAG, contre maximum 7 % pour le diesel actuel. S'il permet de réduire les émissions de GES, le B100 n'est pas compatible avec tous les moteurs diesels et est plus émetteur de NOx. Son caractère hydrophile engendre un risque de développement de bactéries et de champignons ;
- L'**HVO** (Hydrotreated Vegetable Oil) est un carburant à base d'huiles végétales hydrotraitées, utilisable dans les moteurs diesel actuels (pur ou mélangé au gazole). L'HVO présente l'avantage de n'imposer aucune modification de la motorisation des navires propulsés avec du diesel, tout en garantissant une réduction des GES ;
- Le **BTL** (Biomass to Liquid) est un type de biocarburant obtenu grâce à une conversion thermo-chimique de la biomasse via un procédé de gazéification et une synthèse Fischer-Tropsch permettant d'obtenir un carburant liquide. Le BTL a des propriétés comparables voire supérieures à celles du diesel, et peut-être utilisé en mélange avec le diesel, sans restriction sur les proportions en mélange. Par manque de disponibilité du carburant, il n'y a eu aucune expérimentation du BTL dans le secteur maritime en France : cette solution n'est donc pas approfondie dans le présent guide.

Le recours aux biocarburants permet de réduire les émissions de GES du « puits à la roue », s'ils respectent les critères de durabilité de la directive 2009/28/CE et en l'absence d'effets liés à des changements d'affectation des sols. Ils permettent également une réduction de certains polluants (CO, HC et PM).

2. Domaine de pertinence

La solution décrite dans cette fiche concerne l'ensemble des pilotines équipées d'un moteur diesel, disposant d'un approvisionnement pérenne en biocarburant.

3. Solutions associées

Deux alternatives biocarburants aux moteurs diesel existent pour le secteur maritime :

- Le **navire B100**, en cours de R&D et de phases de tests, qui repose sur l'utilisation de B100 pour alimenter un ou plusieurs moteurs diesel ;
- Le **navire HVO**, en cours de R&D et de phases de tests, qui repose sur l'utilisation d'HVO pour alimenter un ou plusieurs moteurs diesel.

4. Contexte et réglementation

L'Union européenne a fixé un objectif européen de 45 % d'énergie renouvelable dans les transports, tous secteurs confondus, pour 2030. Cet objectif est transcrit dans le Code de l'Énergie français³¹. Cet objectif concourt au développement d'alternatives aux carburants fossiles.

Dans le secteur du transport maritime, les biocarburants sont une technologie récente, encore en expérimentation. Plusieurs projets émergent : un test sur un yacht a été réalisé fin 2022³², ~~un~~ sur un ferry au printemps 2023³³ ou encore sur une vedette de la SNSM depuis août 2023³⁴.

La réglementation autour des biocarburants se construit au fur et à mesure du développement des technologies. Des obligations ont déjà été mises en œuvre³⁵ :

- Tout biocarburant doit prouver une réduction des émissions de gaz à effet de serre d'au moins 50 % par rapport à l'équivalent fossile (60 % pour les unités les plus récentes) ;
- Les biocarburants ne doivent pas être produits à partir de terres riches en biodiversité et de terres présentant un important stock de carbone ou de tourbières.

³¹

https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043213513#:~:text=Version%20en%20vigueur%20depuis%20e%2001%20juillet%202021,Modifi%C3%A9%20par%20Ordonnance&text=L'Etat%20cr%C3%A9e%20les%20conditions,au%20moins%2015%20%25%20en%202030.

³² <https://www.meretmarine.com/fr/vie-portuaire/la-seyne-un-premier-yacht-avitaille-en-biocarburant-a-base-d-huile-de-friture>

³³ <https://www.ouest-france.fr/corse/un-navire-de-la-corsica-ferries-a-navigue-grace-a-un-biocarburant-de-totalenergies-5317a8a4-daab-11ed-818a-3b706fa5b3fd>

³⁴ <https://france3-regions.francetvinfo.fr/bretagne/finistere/brest/environnement-un-biocarburant-potentiellement-revolutionnaire-deja-teste-sur-les-navires-de-la-snsm-2823722.html>

³⁵ <https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants>

Solution 1 : B100

1. Principes

Un navire B100 est mu par un ou plusieurs moteurs diesel, alimentés par du B100.

Le B100 est un carburant composé d'esters méthyliques d'acides gras (EMAG), obtenu à partir d'huiles végétales extraites de plantes oléagineuses (colza ou tournesol par exemple), de graisses animales, d'huiles végétales alimentaires ou de déchets graisseux. Il contient 100 % d'EMAG, contre maximum 7 % pour le diesel actuel.

S'il permet de réduire les émissions de GES, le B100 n'est pas compatible avec tous les moteurs diesels et est plus émetteurs de NOx. Son caractère hydrophile engendre un risque de développement de bactéries et de champignons.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Pour les véhicules routiers, l'autonomie et la consommation d'un véhicule fonctionnant au B100 sont sensiblement équivalentes à celle d'un véhicule fonctionnant au gazole (de 0 à +5 % de surconsommation en fonction du type de voirie³⁶). En revanche, il existe peu de documentation sur les performances atteintes dans le secteur maritime. Au regard de la similitude technique des moteurs utilisés pour le routier et pour les pilotines, on peut supposer que le « surcoût » énergétique du B100 par rapport au diesel est équivalent.

Concernant, l'impact sur les GES, la réduction en sortie de moteur est estimée à 60 %³⁷.

Type véhicule	Gains énergétiques * liés à cette solution (% de réduction de la consommation)	Gains GES liés à cette solution (% de réduction des émissions de GES)
Pilotine	-5 à 0 %	60%

* Les gains négatifs correspondent à une surconsommation.

3. Domaine de pertinence

La solution décrite dans cette fiche concerne l'ensemble des pilotines équipées d'un ou de plusieurs moteurs diesel compatibles avec l'utilisation du B100 comme carburant exclusif.

Le B100 nécessite une filière d'approvisionnement pérenne.

A ce jour, peu d'expérimentations de B100 sont en cours dans le secteur maritime.

4. Mise en œuvre

L'offre commerciale de navires B100 pour le secteur maritime est peu développée. Il est donc préconisé de réaliser une étude de faisabilité technico-économique avant la mise en place de cette solution, intégrant notamment les contextes d'utilisation de ces navires. Par ailleurs, la faisabilité de cette solution peut être considérée comme faible du fait du manque de maturité de la solution et de la faible disponibilité de ces engins (en phase de R&D).

³⁶ [Les énergies disponibles | Kit Environnement \(terre-tlf.fr\)](https://www.energies-disponibles.com/Kit-Environnement-terre-tlf.fr)

³⁷ <https://oleo100.com/actualites/article/loi-de-transition-energetique-les-vehicules-b100-exclusifs-reconnus-comme-vehicules-propres-a-faibles-emissions/>

Il n'existe pas de retours sur les coûts de déploiement de ce dispositif pour le secteur maritime. Cependant, dans la mesure où le B100 est directement compatible avec une partie des moteurs diesel, les investissements à réaliser pour l'achat de ce type de navire devraient être équivalents à des navires diesel standards. Une étude de faisabilité technico-économique permettra tout de même de vérifier la compatibilité de la flotte et de préciser les prérequis opérationnels (positionnement des cuves de carburants et approvisionnement, identification d'éventuels impacts opérationnels, ajustement des procédures de conduite et de maintenance, etc.).

Il sera aussi nécessaire de posséder une cuve dédiée à ce carburant sur site. Il est possible soit d'utiliser une cuve existante en remplaçant le carburant stocké par du B100, soit de construire une nouvelle cuve. Le fonctionnement en cuve est inchangé et l'entretien est globalement similaire, avec à noter un surcoût probable du fait du caractère hydrophile et détergeant du B100.

Des cuves connectées peuvent permettre un suivi des stocks et des programmations de livraisons de produit plus adaptées. Pour ce type de carburant, la façon de faire le plein reste inchangée, ce qui favorise son adoption. Les besoins d'entretien peuvent quant à eux être différents.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre de pilotines fonctionnant au B100 (en absolu et en relatif) ;
- Nombre de mises à bord de pilotes effectuées par ces pilotines B100 (en absolu et en relatif) ;
- Milles nautiques (en absolu et en relatif) parcourus par les pilotines B100 ;
- Nombre d'heures de fonctionnement (en absolu et en relatif) des pilotines B100 ;
- Consommation de B100 correspondante.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploitation du fichier de suivi de la flotte ;
- Suivi de la consommation énergétique des pilotines.

Solution 2 : HVO

1. Principes

Un navire HVO est mu par un ou plusieurs moteurs diesel, alimenté(s) par du HVO en mélange ou non avec du diesel.

L'HVO (Hydrotreated Vegetable Oil) est un carburant de synthèse à base d'huiles végétales hydrotraitées, utilisable dans les moteurs diesel actuels (pur ou mélangé au gazole).

L'HVO présente l'avantage de n'imposer aucune modification de la motorisation des navires propulsés avec du diesel, tout en garantissant une réduction des GES.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Pour les véhicules routiers, la surconsommation des véhicules HVO est estimée de 5 à 10 %³⁸ par rapport au diesel traditionnel. Au regard de la similitude technique des moteurs utilisés pour le routier et pour les pilotines, on peut supposer que le « surcoût » énergétique du HVO par rapport au diesel est équivalent.

Concernant, l'impact sur les GES, la réduction est de 82,7 % par litre consommé en comparaison au MDO³⁹.

Type véhicule	Gains énergétiques * liés à cette solution (% de réduction de la consommation)	Gains GES liés à cette solution (% de réduction des émissions de GES)
Pilotine	-10 à -5 %	82,7 %

* Les gains négatifs correspondent à une surconsommation.

3. Domaine de pertinence

La solution décrite dans cette fiche concerne l'ensemble des navires équipés d'un ou de plusieurs moteurs diesel compatibles avec l'utilisation de l'HVO comme carburant exclusif ou en mélange avec du diesel.

Une filière d'approvisionnement en HVO est nécessaire. Cependant, sa commercialisation est difficilement envisageable à grande échelle compte tenu du coût actuel du carburant. Il est probable que ce coût baisse à l'avenir, mais sa complexité de fabrication est indéniablement un frein à son développement.

4. Mise en œuvre

L'offre commerciale de navires HVO pour le secteur maritime est peu développée. Il est donc préconisé de réaliser une étude de faisabilité technico-économique avant la mise en place de cette solution, intégrant notamment les contextes d'utilisation de ces navires. Par ailleurs, la faisabilité de cette

³⁸ Carburant HVO : le diesel de synthèse un peu plus propre ? (autoplus.fr)

³⁹ Base Empreinte® (ademe.fr), FE HVO = 0,057 gCO₂e/kWh PCI et FE MDO = 0,330 gCO₂e/kWh PCI

solution peut être considérée comme faible du fait du manque de -maturité de la solution et de la faible_disponibilité de ce biocarburant.

Il n'existe pas de retours sur les coûts de déploiement de ce dispositif pour le secteur maritime. Cependant, dans la mesure où l'HVO est directement compatible avec une partie des moteurs diesel, les investissements à réaliser pour l'achat de ce type de navire devraient être équivalents à des navires diesel standards. Une étude de faisabilité technico-économique permettra tout de même de vérifier la compatibilité de la flotte et de préciser les prérequis opérationnels (positionnement des cuves de carburants et approvisionnement, identification d'éventuels impacts opérationnels, ajustement des procédures de conduite et de maintenance, etc.).

Il sera aussi nécessaire de posséder une cuve dédiée à ce carburant sur site. Il est possible d'utiliser une cuve existante en remplaçant le carburant stocké par de l'HVO, soit de construire une nouvelle cuve. Le fonctionnement en cuve est inchangé et l'entretien est similaire. Il est toutefois conseillé de réaliser un nettoyage de la ou des cuves avant le premier remplissage avec de l'HVO. Des cuves connectées peuvent permettre un suivi des stocks et des programmations de livraisons de produit plus adaptées. Pour ce type de carburant, la façon de faire le plein reste inchangée ce qui favorise son adoption. Les besoins d'entretien peuvent quant à eux être différents.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi de la solution :

- Nombre de pilotines fonctionnant au HVO (en absolu et en relatif) ;
- Nombre de mises à bord de pilotes effectuées par ces pilotines HVO (en absolu et en relatif) ;
- Milles nautiques (en absolu et en relatif) parcourus par les pilotines HVO ;
- Nombre d'heures de fonctionnement (en absolu et en relatif) des pilotines HVO ;
- Consommation de HVO correspondante.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploitation du fichier de suivi de la flotte ;
- Suivi de la consommation énergétique des pilotines.

A2 FA 5 : Collecte et analyse des informations

Synthèse

1. Description de l'action

Un enjeu clé de la transition énergétique des pilotines réside dans le fait de récolter les données. Peu importe le domaine, la création de base de données et l'analyse de paramètres en fonction de divers facteurs est un axe primordial pour prendre la décision la plus judicieuse possible en termes d'amélioration énergétique.

Cet axe peut être découpé en trois points clés :

- Quelles sont les données clés à récolter et analyser pour les pilotines ?
- Comment récolter ces données ?
- Comment exploiter les données pour réduire l'impact environnemental des pilotines ?

2. Domaine de pertinence

Il est pertinent pour toute pilotine de collecter des informations relatives à son allure et sa consommation afin de les analyser et de trouver d'éventuels axes d'amélioration.

3. Solutions associées

Il existe plusieurs types de données récoltables à bord des pilotines. Deux semblent particulièrement essentielles. Il s'agit de la vitesse (généralement en nœuds ou en milles/h) et de la consommation de la pilotine (généralement en L/h ou en L/milles).

- **L'économètre** est un outil permettant de mesurer ces 2 indicateurs.

4. Contexte et réglementation

Les acteurs du transport maritime sont globalement au fait de l'importance de la collecte et de l'analyse de données. Par exemple, le port de Sète réalise un suivi des consommations et de la performance énergétique⁴⁰ de ses pilotines (en attente de la mise en place d'économètres) pour suivre leurs usages et optimiser leur exploitation. Au Havre, les pilotines sont équipés de récepteur AIS (Automatic Identification System) relié à une carte électronique, ce qui permet de suivre les navires et le trafic dans la rade. La station de pilotage dispose également d'un suivi des consommations de carburant et de la vitesse de déplacement des pilotines.

La réglementation actuelle n'impose pas de suivi ni d'analyse d'informations pour les pilotines.

Il existe des programmes, dans le secteur maritime, pour encourager à la collecte d'informations. C'est le cas du programme AMAREE (Accompagnement des MARins pêcheurs pour la Réalisation d'Economies d'Energies) lancé en 2019⁴¹. Parmi les mesures, l'installation d'économètres et la mise en

⁴⁰ L GO et kgCO₂/opération

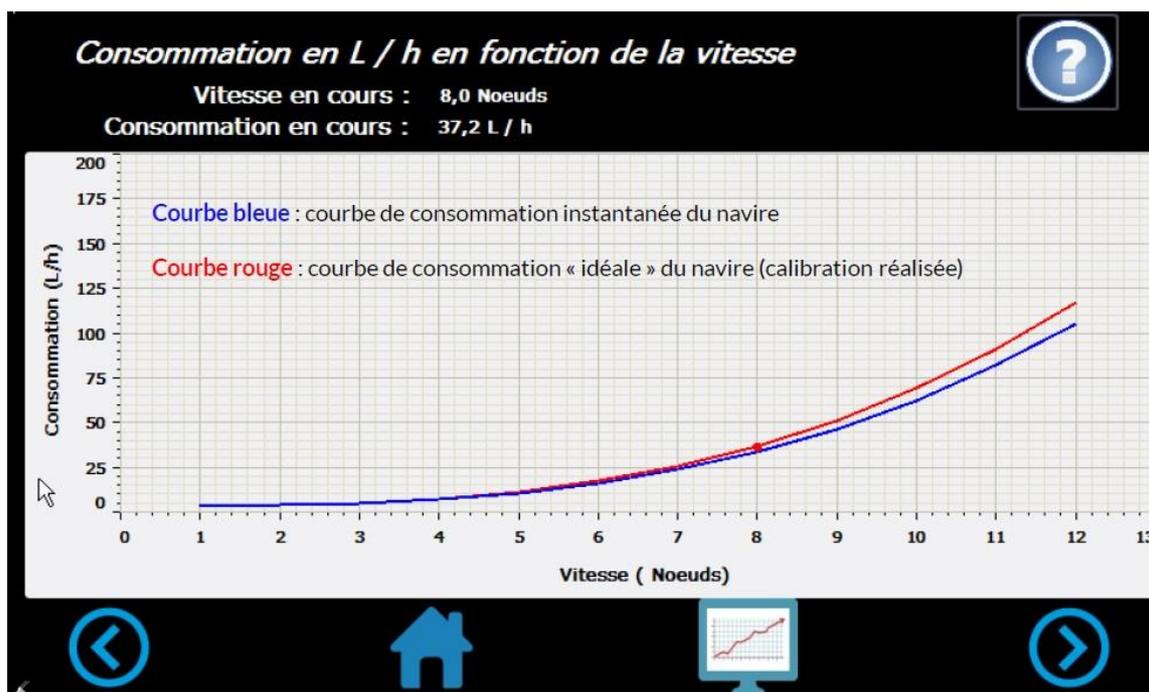
⁴¹ [Amarree – Accompagnement des Marins pêcheurs pour la Réalisation d'Economies d'Energie](#)

œuvre d'un observatoire économique du carburant ont été réalisées. Ce type d'initiatives tend à prouver l'importance reconnue d'une connaissance du fonctionnement des navires pour trouver des axes d'amélioration.

Solution 1 : Economètre

1. Principes

Un économètre est un outil support qui permet aux pilotes de suivre la consommation énergétique de leur pilotine (en L/h par exemple pour les navires fonctionnant avec un carburant fossile liquide) en fonction de la vitesse instantanée de celle-ci. De plus, un économètre calcule la consommation idéale du navire en temps réel, grâce à un calibrage réalisé en amont. Cela permet au patron de la pilotine d'ajuster la vitesse pendant le déplacement pour s'approcher de la consommation idéale⁴².



Source : Programme AMARREE

Outre la visualisation des données en direct, l'économètre permet d'enregistrer ces données pour une extraction et une exploitation a posteriori. Les modèles actuels d'économètre permettent cette extraction via clé USB.

L'exploitation des données permet la visualisation des informations sur une échelle temporelle, pouvant rendre compte des évolutions et de l'impact de facteurs extérieurs (conditions météorologiques par exemple).

Les données peuvent être partagées à un niveau local ou plus largement, permettent la comparaison avec d'autres pilotines.

Ces possibilités permettent de créer des bases de données utiles pour le suivi et l'optimisation de l'utilisation des pilotines.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

L'utilisation d'économètre à proprement parler n'entraîne pas de gain énergétique : tout dépend de ce qui est fait du recueil d'information (changement de motorisation, réduction de vitesse ou autre). L'impact est donc indirect.

⁴² [Équiper les bateaux d'un économètre pour faire baisser leur consommation de carburant | Techniques de l'Ingénieur \(techniques-ingenieur.fr\)](http://techniques-ingenieur.fr)

3. Domaine de pertinence

Il est pertinent pour n'importe quelle pilotine de s'équiper d'un économètre. Les patrons de pilotines ayant été formés à l'écopilotage (voir A3 FA1) s'approprieront d'autant plus facilement cet outil.

4. Mise en œuvre

Pour utiliser un économètre, les caractéristiques du navire concerné sont envoyées en amont à l'installateur de l'économètre. En effet, des paramètres comme le type de moteur et de GPS influent sur le type d'économètre à installer à bord⁴³. Une fois le type et la référence d'économètre choisis, l'installation devient possible, grâce à l'assistance d'un mécanicien et d'un électronicien.

En 2021, le coût de l'achat et de l'installation d'un économètre s'élevait à environ 15 000 € TTC⁴⁴.

Les patrons de pilotines doivent être formés à l'utilisation de l'outil. C'est primordial pour une utilisation la plus efficace possible.

Il est également recommandé de mettre en œuvre un tableau de bord de suivi des données afin de compiler l'ensemble des informations collectées dans un seul document pour en faciliter l'exploitation et le partage éventuel.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi :

- Nombre de pilotines (en absolu et en relatif) équipées d'un économètre.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Tableau de bord de suivi de la flotte.

⁴³ [CM_AMARREE_Synthèse et Bilan_VF.pdf - Google Drive](#)

⁴⁴ <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/equiper-les-bateaux-dun-econometre-pour-faire-baisser-leur-consommation-de-carburant-105628/>

Axe 3 : Information / sensibilisation

A3 FA 1 : Formations	50
Solution 1 : Ecopilotage.....	51
A3 FA 2 : Participation à des sessions d'informations.....	53
Solution 1 : Sessions d'information.....	54

A3 FA 1 : Formations

Synthèse

1. Description de l'action

L'objectif principal d'un programme d'écopilotage est de modifier les comportements des pilotes des pilotines afin qu'ils adoptent de manière pérenne une conduite économe en carburant.

2. Domaine de pertinence

Cette action est destinée à l'ensemble des patrons de pilotines.

3. Solutions associées

Une seule solution associée : l'écopilotage.

4. Contexte et réglementation

Si la réglementation française n'impose pas, à proprement parler, de formations à l'éco-conduite, ces notions sont en partie incluses au sein des formations initiales au métier, mais dans un format non adapté aux spécificités de chaque entreprise, d'où l'importance de ces formations spécifiques « éco-conduite » proposées le plus souvent en format intra-entreprise.

Solution 1 : Ecopilotage

1. Principes

L'objectif d'un programme d'écopilotage est de modifier les comportements des patrons de pilotines afin qu'ils adoptent de manière pérenne une navigation économe en énergie.

Les formateurs internes ou externes à la société accompagnent, conseillent les patrons de pilotines et analysent leur façon de naviguer afin de les accompagner à adopter une navigation raisonnée.

Cette formation peut être complétée par l'installation d'outils d'aide à l'écopilotage intégrés assurant à tout moment au patron de la pilotine de savoir la meilleure vitesse à laquelle naviguer (voir A2 FA5).

2. Impact sur les améliorations énergétiques

L'impact de cette solution sur la consommation énergétique de la pilotine varie selon la navigation du pilote et selon les conditions en mer.

De façon générale pour les camions poids-lourds, des études ont démontré qu'une formation à l'éco-conduite permettrait de réduire de 5 à 25 % la consommation de carburant⁴⁵. Cependant, les gains s'estompent très fortement dans l'année qui suit la formation si aucune autre mesure complémentaire n'est prise (formation de rappel ou mise en place de management interne spécifique à l'éco-conduite). C'est pourquoi il est important de déterminer un plan d'action sur le long terme en choisissant un niveau de formation à l'écopilotage.

Trois niveaux de formation à l'écopilotage peuvent être isolés, avec chacun un impact différent sur la réduction pérenne des consommations énergétiques :

- Première formation à l'écopilotage : impact faible (30 % de l'impact maximal)
- Formations régulières à l'écopilotage : impact moyen (60 % de l'impact maximal)
- Système de management de la performance écopilotage : impact maximal (100 % de la réduction)

Ainsi un gain moyen de l'ordre de 4,5 % (= [5-25] % * 30 %) peut être retenu en première hypothèse de gain⁴⁶.

3. Domaine de pertinence

La formation à l'écopilotage concerne tous les patrons de pilotines.

4. Mise en œuvre

Il existe quelques entreprises qui réalisent des formations sur l'écopilotage maritime. Certaines grandes sociétés privilégient la mise en place d'un centre de formation interne. Les formateurs accompagnent et conseillent les pilotes. Ces formations permettent également de constituer ou de réviser un manuel des bonnes pratiques.

⁴⁵ Formation Eco-conduite poids lourd | ECF PRO

⁴⁶ En se basant sur la réduction moyenne observée pour le transport routier de marchandises.

Certains ports possèdent des simulateurs pour la formation et le maintien de connaissance des pilotes (comme le port du Havre)⁴⁷. Les pilotes peuvent donc affiner leurs pratiques d'écopilotage lors de ces séances de simulation.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Nombre de patrons de pilotines ayant reçu une formation à l'écopilotage ;
- Description du management écopilotage mis en place dans la station.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Exploiter le fichier de suivi des formations.

⁴⁷ [Log-Te Maritime portuaire Entretien Station de pilotage Port du Havre.pptx \(sharepoint.com\)](#)

A3 FA 2 : Participations à des sessions d'information

Synthèse

1. Description de l'action

La participation à des sessions d'information (colloque, webinaire, etc.) permet de maintenir une veille sectorielle constante sur les enjeux sectoriels de transition énergétique. Ces sessions servent aussi à rassembler les parties prenantes, obtenir des retours d'expérience innovants et comprendre les enjeux et orientations sectorielles à venir.

2. Domaine de pertinence

Cette action est destinée à l'ensemble des acteurs (société, pilotes, etc.).

3. Solutions associées

Une seule solution associée : la participation à des sessions d'information.

4. Contexte et réglementation

Aucune contrainte réglementaire ne s'applique à cette action mais elle fait écho à la stratégie globale de décarbonation du secteur maritime (notamment l'actualisation 2023 de la stratégie de l'OMI de concernant la réduction des émissions de GES provenant des navires).

Solution 1 : Sessions d'information

1. Principes

La participation à des sessions d'information (colloque, webinaire, etc.) permet de maintenir une veille constante sur les enjeux sectoriels de transition énergétique.

Elle facilite notamment :

- La rencontre et la mobilisation des parties prenantes : patrons de pilotines, stations de pilotage et représentants des acteurs économiques, gestionnaires de ports et d'infrastructures, élus, partenaires institutionnels et organisations syndicales ;
- La présentation de retours d'expérience innovants permettant de supprimer les réticences au changement : présentation des difficultés rencontrées et de résultats concrets ;
- Le décryptage des enjeux et des orientations sectoriels ;
- L'identification des nouvelles réglementations.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

L'impact d'une participation à une session d'information (colloque, conférence, webinaire, etc.) sera nécessairement indirect.

La participation à des sessions d'information permet en outre de rester en éveil sur les enjeux techniques du secteur.

3. Domaine de pertinence

Cette solution est pertinente pour tous les patrons de pilotines.

4. Mise en œuvre

La définition des personnels pertinents pour participer à ces sessions dépendra des thématiques traitées et de leur capacité à orienter les décisions stratégiques de la station.

5. Suivi de la solution

Indicateur de suivi de la solution :

- Nombre de patrons de pilotines ayant participé à ces sessions d'information sectorielles.

Modalités pratiques de collecte des données :

- Suivi des sessions existantes et du taux de participation ;
- Suivi de l'évolution des thématiques abordées.

Axe 4 : Organisation des flux

A4 FA 1 : Organisation du trajet des pilotines par le groupage des pilotes	56
Solution 1 : Optimisation du transfert des pilotes	57
A4 FA 2 : Réduction de la vitesse	59
Solution 1 : Réduction de la vitesse	60

A4 FA 1 : Organisation du trajet des pilotines par le groupage des pilotes

Synthèse

1. Description de l'action

Les dépenses énergétiques des pilotines sont essentiellement liées aux déplacements qu'elles réalisent pour acheminer les pilotes sur les navires arrivant dans les ports ou en sortant.

Pour réduire le nombre de déplacements effectués et ainsi les milles nautiques parcourus, il est possible de faire du groupage de pilotes. Il s'agit de transporter plusieurs pilotes, pour assister plusieurs navires, en une seule sortie.

2. Domaine de pertinence

Cette solution est pertinente pour toutes les sorties où les distances parcourues avec le groupage sont inférieures aux distances qui seraient parcourues sans groupage.

3. Solutions associées

Une seule solution associée : l'optimisation du transfert des pilotes.

4. Contexte et réglementation

L'activité des stations de pilotage est régie par le Code des Transports et est affinée par les règlements locaux propres à chaque port. Ils déterminent notamment les zones d'intervention des pilotes ainsi que les délais d'intervention et les types de navires soumis à l'obligation d'assistance par un pilote⁴⁸.

Les sorties des pilotines sont déterminées en fonction des arrivées des navires dans les ports et sous couvert du respect du règlement local du port et des directives des autorités portuaires. Les pilotes doivent en effet respecter certains délais d'intervention. Le groupage des pilotes est donc possible uniquement lorsque des navires arrivent quasiment simultanément.

Cette solution est actuellement en réflexion dans certaines stations de pilotage, comme au Port du Havre – Fécamp par exemple.

⁴⁸ [note-de-synthèse-isemar-166.pdf](#)

Solution 1 : Optimisation du transfert des pilotes

1. Principes

Le groupage de pilotes consiste à transporter plusieurs pilotes à bord d'une même pilotine ce qui permet de diminuer le nombre de sorties en mer. Le but est de réduire la distance journalière parcourue par les pilotines. Cela peut également être réalisé pour la débarque des pilotes, en récupérant plusieurs pilotes sans repasser par le port.

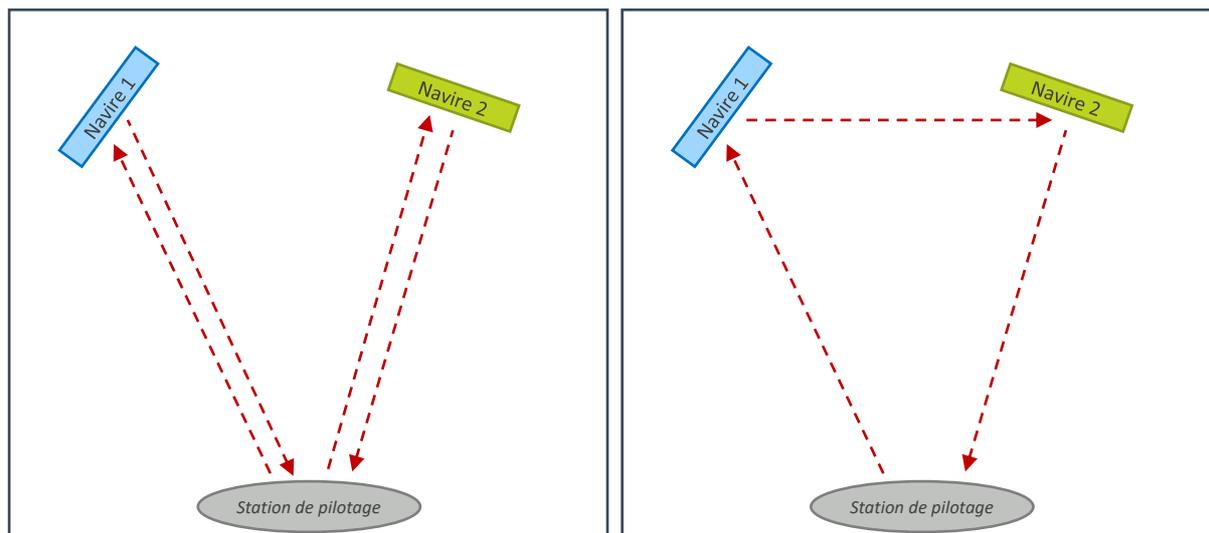


Illustration des trajets réalisés sans groupage de pilotes (à gauche) et avec groupage des pilotes (à droite)

Pour faciliter le groupage, il peut être envisagé un temps d'attente entre les dessertes des navires, en fonction de leurs arrivées.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

Le groupage permet de réduire la distance parcourue par les pilotines en réduisant son nombre de sorties par l'optimisation des trajets. Les gains énergétiques sont donc variables et relatifs :

- Au nombre de sorties effectuées avec le groupage par rapport au nombre de sorties effectuées sans groupage ;
- Aux distances parcourues en groupant les pilotes par rapport aux distances parcourues sans groupage.

Les pourcentages de gains en termes de réduction des émissions de GES seront identiques aux pourcentages des gains énergétiques.

3. Domaine de pertinence

Le groupage des pilotes peut être appliqué dans tout type de port, sous réserve qu'au moins deux pilotes y travaillent simultanément.

En général, une pilotine peut accueillir une dizaine de personnes en plus des deux membres de l'équipage⁴⁹ ce qui laisse une marge intéressante. Toutefois, cette solution est pertinente uniquement

⁴⁹ EFINOR ALLAIS | PILOTINE 200

si plusieurs navires arrivent dans un temps réduit : en effet, il est peu opportun pour une pilotine de mouiller au large pendant un temps long, pour des raisons de sécurité et également de gestion du temps des pilotes. Ce paramètre de temps d'attente maximal pour les pilotes est à déterminer au cas par cas par les stations de pilotage.

4. Mise en œuvre

Pour mettre en œuvre la solution de groupage, il est nécessaire de connaître à l'avance le trafic du port. L'utilisation des nouvelles technologies est un bon axe pour déterminer les opérations de groupage les plus pertinentes. On peut notamment évoquer les « Smart Ports » qui à l'instar des Smart City s'inspirent des technologies comme la récolte des données, l'Internet of Things et l'intelligence artificielle pour améliorer et adapter les performances des ports maritimes. Par exemple, le port de Rotterdam utilise l'IoT (Internet of Things) avec des capteurs positionnés aux endroits stratégiques du port qui récoltent des informations permettant de déterminer le lieu et le timing idéal pour que les pilotines rejoignent les navires (économies d'énergie et de temps⁵⁰).

C'est dans ce contexte que la récupération et l'analyse de données (cf. A2 FA5) devient essentielle pour ces nouveaux systèmes de management. Cela peut permettre de dégager des schémas typiques afin d'aider à la prise de décision pour définir les conditions les plus pertinentes pour assister les navires.

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi :

- Nombre d'opérations pilotées ;
- Nombre de milles nautiques parcourus par les pilotines ;
- Nombre d'heures de fonctionnement des pilotines ;
- Temps moyen de sortie d'une pilotine en mer.

Modalités pratiques de collecte de données :

- Suivi du tableau de bord, si existant ;
- Utilisation des instruments de collecte de données.

⁵⁰ [Les smart ports, une solution pour favoriser la transition énergétique et écologique dans le milieu maritime ? - TransportShaker \(transportshaker-wavestone.com\)](https://transportshaker-wavestone.com)

A4 FA 2 : Réduction de la vitesse

Synthèse

1. Description de l'action

Les pilotines sont des navires de petite taille, puissants, capables de se projeter rapidement auprès des navires entrant ou sortant d'un port.

La dépense énergétique des pilotines est directement liée à la quantité de carburant utilisée pour le déplacement. Une solution pour réduire la quantité d'énergie nécessaire est de diminuer la vitesse de déplacement de la pilotine. Cette diminution entraîne un besoin moins important en carburant se traduisant par un gain énergétique, tout en conservant un temps de déplacement acceptable.

2. Domaine de pertinence

Cette solution est pertinente pour l'ensemble des pilotines, quel que soit le type de motorisation.

3. Solutions associées

Une seule solution associée : la réduction de la vitesse.

4. Contexte et réglementation

La vitesse de déplacement est réglementée dans les ports et leurs abords.

Les pilotines, par leur fonction, sont parmi les navires les plus rapides des ports maritimes. Leur vitesse moyenne de service est généralement comprise entre 15 et 20 nœuds.

La station de pilotage du port du Havre a fait le choix de réduire la vitesse de service de ses pilotines, la diminuant de 20 à 18 nœuds, pour réduire la consommation de carburant et l'usure du navire. Cette diminution est associée à une prime au gasoil, calculée en fonction d'une consommation en litre par heure.

Solution 1 : Réduction de la vitesse

1. Principes

Le principe de l'action est simple : réduire la vitesse moyenne de service des pilotines. L'objectif est de diminuer la consommation de carburant.

2. Impact sur les améliorations énergétiques

L'adaptation de la vitesse entraîne un gain énergétique lié à la baisse de consommation de carburant. Pour une motorisation diesel, les retours d'expérience estiment à 10 à 15 % le gain énergétique⁵¹.

Équipement	Gains énergétiques liés à cette solution (% de réduction de la consommation)	Gains GES liés à cette solution (% de réduction des émissions de GES)
Réduction de la vitesse	10 à 15 %	10 à 15 %

La baisse de vitesse entraîne également un gain énergétique pour des motorisations autres que le diesel puisque la consommation d'énergie baisse. Les retours d'expérience actuels ne permettent cependant pas d'avancer de valeur précise. En première approximation on peut faire l'hypothèse que le gain sera du même ordre de grandeur que celui associé à une motorisation diesel.

3. Domaine de pertinence

Cette solution est pertinente pour l'ensemble des pilotines, quelles que soient leurs motorisations.

4. Mise en œuvre

La mise en œuvre de la solution peut être considérée comme intermédiaire puisqu'il suffit de diminuer/ajuster la vitesse des pilotines lors de leurs déplacements (en fonction des contraintes opérationnelles), mais cela nécessite au préalable de calibrer des courbes de rendement des carènes puis de les analyser pour déterminer la meilleure vitesse de service⁵².

Des outils de suivi, tels que l'économètre, installés dans les pilotines facilitent cet objectif (voir A2 FA5).

5. Suivi de la solution

Indicateurs de suivi :

- Vitesse moyenne des pilotines ;
- Consommation de carburant.

Modalités pratiques de collecte de données :

- Tableau de bord (ou économètre) ;
- Suivi des factures de carburants.

⁵¹ [Équiper les bateaux d'un économètre pour faire baisser leur consommation de carburant | Techniques de l'Ingénieur \(techniques-ingenieur.fr\)](http://techniques-ingenieur.fr)

⁵² Certaines carènes ont des consommations constantes en litres/mille nautique, entre 12 et 18 nœuds par exemple.

GUIDE DES FICHES ACTIONS DU DISPOSITIF LOG-TE DU PROGRAMME REMOVE POUR L'AMELIORATION DES PERFORMANCES ENERGETIQUES DES FLOTTES DE TRANSPORT MASSIFIE