

POTENTIEL DU BIOGNC DANS LA NAVIGATION FLUVIALE ET MARITIME CÔTIÈRE



EXPERTISES

RAPPORT FINAL

Juin 2024

REMERCIEMENTS

Maria Aranzazu BODEN (GRDF), Philippe CAUNEAU (ADEME), Cécile COHAS (VNF), Richard LECOUCPEAU (2C-Consulting), Nicolas SPILLIAERT (GRDF), Laure SUNE (ADEME), Matthieu CHANIOLEAU (GRDF), Mathieu VERRIERE (VNF)

CITATION DE CE RAPPORT

Denis MISSAGHIEH-PONCET, Olivier PERRIN, Florence VOSSION, ELCIMAÏ ENVIRONNEMENT, Guillaume BAUDRIN, Cyprien HOUSSAY, éKinos
2024. Etude sur les perspectives du bioGNC en navigation fluviale et maritime côtière en France. 101 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 2023MA000191

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : ELCIMAÏ ENVIRONNEMENT ET éKinos

Coordination technique - ADEME : SUNE Laure

Direction/Service : DVTD/Service Transports et Mobilité

Résumé

Dans le contexte actuel d'urgence climatique, la France vise la neutralité carbone d'ici 2050. Dans ce cadre, le transport fluvial et maritime explore des pistes de carburants alternatifs comme l'électrique batterie, l'hydrogène, les biocarburants et le bioGNC pour remplacer le gazole non routier (GNR) utilisé aujourd'hui largement.

Cette étude, menée conjointement par l'ADEME et GRDF, et avec la participation de VNF, évalue les perspectives de déploiement du bioGNC dans le transport fluvial et maritime côtier. L'étude repose sur une revue bibliographique, des entretiens auprès des acteurs de l'écosystème, et des études de cas spécifiques.

Le bioGNC est un combustible produit localement qui pourrait réduire les émissions de gaz à effet de serre d'une unité fluviale ou d'un navire de 80 à 85% comparé au GNR. Mais dans la situation actuelle d'une filière pour laquelle le cadre réglementaire n'est pas encore optimisé, un changement de motorisation coûte entre 545 k€ et 1065 k€ selon le type d'unité, pour une architecture propulsive 100% GNC. Ces coûts peuvent être partiellement amortis (jusqu'à 60%) en mutualisant les coûts d'étude relatifs à la marinisation et à l'homologation d'un moteur GNV routier.

Concernant l'exploitation d'un bateau bioGNC, l'avitaillement doit davantage tenir compte du schéma d'exploitation, du fait d'une densité énergétique du bioGNC 3 à 5 fois moins importante que le GNR limitant l'autonomie à volume égal. Pour répondre à cette contrainte, de nouveaux schémas d'avitaillement adaptés émergent : recharge lente la nuit, recharge en temps masqué avec le transfert de container, etc.

Ainsi, le bioGNC est comme dans le routier adapté aux flottes captives ou semi-captives avec des temps de navigation courts (inférieur à trois jours) et une vitesse de navigation régulière et modérée. Les unités de moyennes et grandes tailles sont plus adaptées car le stockage du bioGNC à bord nécessite de l'espace.

Le bioGNC présente un potentiel de déploiement non négligeable pour le transport fluvial : il pourrait concerner 12% à 40% de la flotte d'automoteurs et de pousseurs. En ce qui concerne les unités maritimes côtières, les navires de liaison inter-îles et passage d'eau ou certains navires de pêches captifs sont également très adaptés pour l'usage du bioGNC. Le bioGNC ne peut en revanche pas répondre à tous les usages et est complémentaire à d'autres solutions comme l'électrification, en fonction des besoins de chaque armateur.

En revanche, le bioGNC est disponible immédiatement avec des technologies matures et éprouvées, et les volumes de biométhane estimés dans cette étude pour le secteur fluvial et maritime à terme sont négligeables (<0,2%) par rapport au potentiel total de production de biométhane à 2050.

Afin d'accompagner l'émergence de cette filière, il est nécessaire de constituer un cadre réglementaire clair, conjugué à des démonstrateurs dont il faut faciliter l'émergence, mais aussi de sensibiliser les acteurs à la solution bioGNC. Le positionnement stratégique de stations d'avitaillement mutualisées de différents usages fluviaux (notamment autour de sites industriels) ainsi qu'en mobilité terrestre, revêt également une importance capitale. Enfin, l'accompagnement (technique et financier) des acteurs (des armateurs aux motoristes) est crucial. Cet accompagnement financier pourrait par exemple passer par le PAMI, qui aujourd'hui ne finance que les solutions hybrides (électrique-GNC) – car le RGEC ne permet plus de soutenir des solutions à base d'énergie fossile - ce qui suppose toutefois une adaptation des règles européennes à l'occasion de la prochaine réglementation sur les aides d'Etat.

L'étude se focalise sur le bioGNC et ne met pas en perspective cette solution avec le bilan d'autres carburants alternatifs.

Abstract

In the current context of the climate emergency, France aims for carbon neutrality by 2050. In this context, inland and maritime transport are exploring alternative fuel options such as battery electric, hydrogen, biofuels, and bioCNG to replace the widely used non-road diesel (NRD).

This study, conducted jointly by ADEME and GRDF, with the participation of VNF, evaluates the prospects for the deployment of bioCNG in inland and coastal maritime transport. The study is based on a literature review, interviews with ecosystem stakeholders, and specific case studies.

BioCNG is a locally produced fuel that could reduce greenhouse gas emissions of a river unit or a vessel by 80 to 85% compared to NRD. However, in the current situation of a sector where the regulatory framework is not yet optimized, a change of engine costs between 545k€ and 1,065k€ depending on the type of unit, for a 100% CNG propulsion architecture. These costs can be partially amortized (up to 60%) by pooling study costs related to the marinization and approval of a road CNG engine.

Regarding the operation of a bioCNG boat, refueling must take more account of the operating scheme, due to the energy density of bioCNG being 3 to 5 times lower than NRD, limiting autonomy to the same volume. To meet this constraint, new adapted refueling schemes are emerging: slow overnight charging, masked time charging with container transfer, etc.

Thus, like in road transport, bioCNG is suitable for captive or semi-captive fleets with short navigation times (less than three days) and regular and moderate navigation speeds. Medium and large-sized units are more suitable as bioCNG storage on board requires space.

BioCNG has significant deployment potential for inland transport: it could concern 12% to 40% of the self-propelled and pusher fleet. As for coastal maritime units, inter-island and waterway crossing vessels or some captive fishing vessels are also very interesting targets for the use of bioCNG. However, bioCNG cannot meet all needs and is complementary to other solutions such as electrification, depending on the requirements of each shipowner.

Nevertheless, bioCNG is immediately available with mature and proven technologies, and the volumes of biomethane estimated in this study for the inland and maritime sector in the long term are negligible (<0.2%) compared to the total potential production of biomethane by 2050.

To support the emergence of this sector, it is necessary to establish a clear regulatory framework based on demonstrators, but also to raise awareness among stakeholders about the bioCNG solution. The strategic positioning of shared refueling stations for different inland uses (notably around industrial sites) and for land mobility is also of paramount importance. Finally, the technical and financial support of stakeholders (from shipowners to engine manufacturers) is crucial. This financial support could, for example, come from the PAMI, which currently only finances hybrid solutions (electric-CNG).

Avertissement : le bioGNV et le verdissement du réseau

Actuellement, le biogaz injecté dans le réseau ne représente que 3% de l'ensemble du gaz distribué. Le gaz physiquement disponible est donc, à 97%, du gaz naturel et non du biogaz.

Ces chiffres sont à mettre en perspective avec la part de BioGNC (comptabilisé via des GO) en France qui atteint 39% du GNC consommé et presque 30% sur l'ensemble du GNV, GNL compris (chiffres ODRE).

Considération pour la présente étude : Les études relatives au « train bioGNV » et au « bateau bioGNC » partent de l'hypothèse que le réseau de gaz, susceptible d'approvisionner les trains et les bateaux en (bio)gaz, sera composé à 100% de biogaz d'ici 2050.

Le rapport Perspectives Gaz de 2022 estime que la consommation totale de gaz naturel pourra être couverte par des sources de gaz renouvelables et à faible teneur en carbone d'ici à 2050. **Notons néanmoins que les scénarios Transition(s) 2050 publiés par l'ADEME estiment que le biogaz couvrira au maximum 88% de la consommation de gaz en 2050** (suffisant pour atteindre la neutralité carbone).

Les régions **Nouvelle Aquitaine, Auvergne Rhône Alpes, Grand Est et Occitanie** ont les plus hauts potentiels de production de biométhane.

Plusieurs mécanismes de traçabilité du biogaz existent :

- Achat de Garanties d'Origine (GO). Notons que depuis 2022, il n'est plus possible de comptabiliser les GO dans les bilans GES (les GO peuvent néanmoins être mentionnées dans le bilan).
- Biogas Purchase Agreement (BPA)
- Autoconsommation

Messages clés de l'ADEME :

- **Le biogaz est une solution de décarbonation du mix énergétique nécessaire** à l'atteinte de la neutralité carbone en 2050.
- **Priorité dans le secteur des transports : (1) sobriété, (2) report modal, (3) décarbonation**
- **Priorité dans le secteur industriel (énergéticiens) : décarboner le gaz** (remplacer le gaz naturel par du biogaz dans le réseau). L'ADEME soutient la méthanisation.
- **L'ADEME encourage la consommation directe** depuis le site de production de bioGNV (L'achat de GO n'est pas préconisé par l'ADEME pour qu'une entreprise verdisse son activité).

SOMMAIRE

1. CONTEXTE ET METHODOLOGIE DE L'ETUDE.....	8
1.2.3. L'écosystème de la navigation fluviale et maritime côtière.....	11
1.3. Le bioGNV, carburant alternatif au gazole.....	15
1.3.1. Distinction entre GNV et bioGNV.....	15
1.3.2. Distinction entre GNC et GNL.....	18
1.3.3. Etat actuel de la production et distribution du biométhane.....	18
1.4. Méthodologie de l'étude.....	20
1.4.1. Analyse documentaire, réglementaire et environnementale.....	20
1.4.2. Entretiens avec les acteurs.....	21
1.4.3. Etude de cas d'usage.....	22
1.4.4. Perspectives de déploiement.....	23
2. LE BIOGNC DANS LE SECTEUR FLUVIAL ET MARITIME COTIER.....	24
2.1. La synthèse des projets et démonstrateurs.....	24
2.2. La vision en synthèse des avis des fournisseurs de carburant.....	29
2.3. Evaluation environnementale comparative du bioGNC.....	29
2.3.1. Les sources de données utilisées.....	30
2.3.2. Le périmètre de l'évaluation environnementale.....	30
2.3.3. Les indicateurs environnementaux considérés.....	31
2.3.4. Les résultats de l'impact environnemental relatif du bioGNC.....	31
2.3.4.1. Le bioGNC par rapport au GNR.....	31
2.3.4.2. Le bioGNC par rapport aux autres carburants.....	33
2.4. Le contexte réglementaire.....	35
2.4.1. La navigation maritime.....	35
2.4.2. La navigation fluviale.....	36
2.4.2.1. Cadre Européen.....	36
2.4.2.2. Demande de dérogation du bioGNC.....	39
2.4.3. Le stockage bioGNC.....	41
2.4.4. L'avitaillement.....	42
2.4.4.1. Exigences particulières.....	42
2.4.4.2. Réglementation spécifique aux stations d'avitaillement (bateau-bateau et camion-bateau).....	42
2.5. La faisabilité technique.....	43
2.5.1. Les différentes architectures propulsives.....	43
2.5.1.1. La remotorisation et la marinisation.....	47
2.5.2. L'avitaillement.....	49
2.5.2.1. Les différents types d'avitaillement en GNC.....	49
2.5.2.2. L'avis des utilisateurs.....	53
2.5.3. Le stockage.....	53
2.5.3.1. Réservoir.....	53
2.5.3.2. Implantation.....	53
2.5.4. Les éléments de sécurité à considérer.....	55
2.5.5. L'impact du GNC sur l'exploitation.....	55
2.5.5.1. Densité énergétique du bioGNC.....	55
2.5.5.2. La relation vitesse/consommation énergétique.....	56
2.6. La faisabilité économique.....	58

2.6.1.	Le coût du carburant.....	58
2.6.1.1.	Prix du GNR et évolution.....	58
2.6.1.2.	Prix du bioGNV et évolution.....	59
2.6.2.	Analyse comparative et mise en lumière des coûts et surcoûts induits.....	61
2.6.2.1.	Coûts des études.....	61
2.6.2.2.	Décomposition des coûts de l'architecture propulsive et de sa marinisation....	62
2.6.2.3.	Synthèse des coûts.....	64
2.6.3.	Le coût des infrastructures d'avitaillement et aménagement.....	64
2.6.4.	Dispositifs de soutien au développement de la filière.....	65
2.7.	Application sur des cas d'usage.....	67
2.7.1.	Le pousseur.....	67
2.7.2.	L'automoteur.....	69
2.7.3.	Les bacs.....	70
2.8.	Les impacts liés à la motorisation (bio)GNC en France.....	71
2.8.1.	Impacts de la plus faible densité énergétique du bioGNC.....	71
2.8.2.	Impacts liés à l'architecture motrice.....	72
3.	LES PERSPECTIVES DE DEPLOIEMENT DU BIOGNC DANS LA FLOTTE FLUVIALE ET MARITIME COTIERE EN FRANCE.....	73
3.1.	Perspectives du bioGNC dans le fluvial.....	73
3.1.1.	La méthodologie en synthèse.....	73
3.1.2.	Construction des scénarios.....	74
3.1.2.1.	Typologies de bateaux retenues.....	74
3.1.2.2.	Hypothèses d'évolution du trafic de fret fluvial et du nombre de bateaux.....	75
3.1.2.3.	Hypothèses d'évolution des gabarits de bateaux.....	75
3.1.2.4.	Résultat des projections d'évolution de la flotte de fret fluvial.....	78
3.1.2.5.	Hypothèses relatives aux moteurs gaz.....	78
3.1.3.	Résultats des scénarios.....	80
3.2.	Perspectives du BioGNC dans le maritime côtier.....	84
3.2.1.	Passage d'eau et liaison inter-îles.....	84
3.2.2.	Navires de pêche côtière.....	84
3.2.3.	Navires spécifiques.....	86
3.2.4.	Perspectives du bioGNC dans le maritime côtier : les limites de la bibliographie.....	86
4.	ENJEUX ET RECOMMANDATIONS.....	88
4.1.	Pédagogie et communication.....	88
4.2.	La réglementation.....	88
4.3.	La perte d'autonomie et le stockage.....	89
4.4.	L'avitaillement.....	90
4.5.	La disponibilité de moteurs gaz marinisés et homologués.....	91
4.6.	La formation de l'équipage.....	91
4.7.	Le soutien politique et financier.....	91
4.8.	Les recommandations pour relever les enjeux.....	92
5.	ANNEXES.....	93
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	97
	INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	99
	SIGLES ET ACRONYMES.....	101

1. Contexte et Méthodologie de l'étude

1.1. Contexte et objectif de l'étude

Dans le secteur du transport, le transport fluvial et maritime côtier est majoritairement utilisé pour le transport de marchandises, et dans une moindre mesure pour le transport de passagers et des activités de services. Les unités fluviales présentent une efficacité énergétique par tonne.km nettement supérieure à celle des transports routiers. Cependant, en 2023, la grande majorité de ces unités et des navires côtiers utilisent du gazole, un carburant fossile qui contribue aux émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques.

L'étude ci-présente, menée conjointement par le Service Transports et Mobilité de l'ADEME (Agence de la Transition Ecologique) et la Direction de la Stratégie de GRDF (Gaz Réseau Distribution France) vise, à partir des projets et études réalisés, à analyser les possibilités de l'utilisation du bioGNC dans le secteur du transport fluvial et maritime côtier, et à identifier les conditions de déploiement de cette filière. Cette étude fournit une analyse technique, économique, environnementale et réglementaire de la filière bioGNC pour le transport fluvial et maritime côtier.

Le périmètre de l'étude concerne le **transport fluvial et maritime côtier (de passagers et de fret) en France Métropolitaine**. Néanmoins, compte tenu du manque d'informations et d'études relatives à l'utilisation du bioGNC dans le transport maritime côtier, ce segment est moins approfondi que celui du **transport fluvial**.

1.2. Périmètre de l'étude

1.2.1. Segments étudiés

Le périmètre global de cette étude concerne le **transport fluvial et maritime côtier, de passager et de fret en France Métropolitaine**. Néanmoins, compte tenu du manque d'informations et d'études relatives à l'utilisation du bioGNC dans le transport maritime côtier, ce segment est moins approfondi que sur le **transport fluvial**.

Les résultats, enjeux et recommandations sont toutefois applicables au périmètre global de l'étude.

1.2.2. Chaîne de valeur considérée

Les éléments étudiés dans cette étude s'articulent en trois catégories :

- Les éléments techniques sur l'unité¹,
- Les éléments techniques en dehors de l'unité,
- Les éléments non techniques, gravitant autour des éléments techniques.

¹ Le terme « unité » est utilisé pour évoquer, sans distinction, les unités fluviales et les unités maritimes côtières

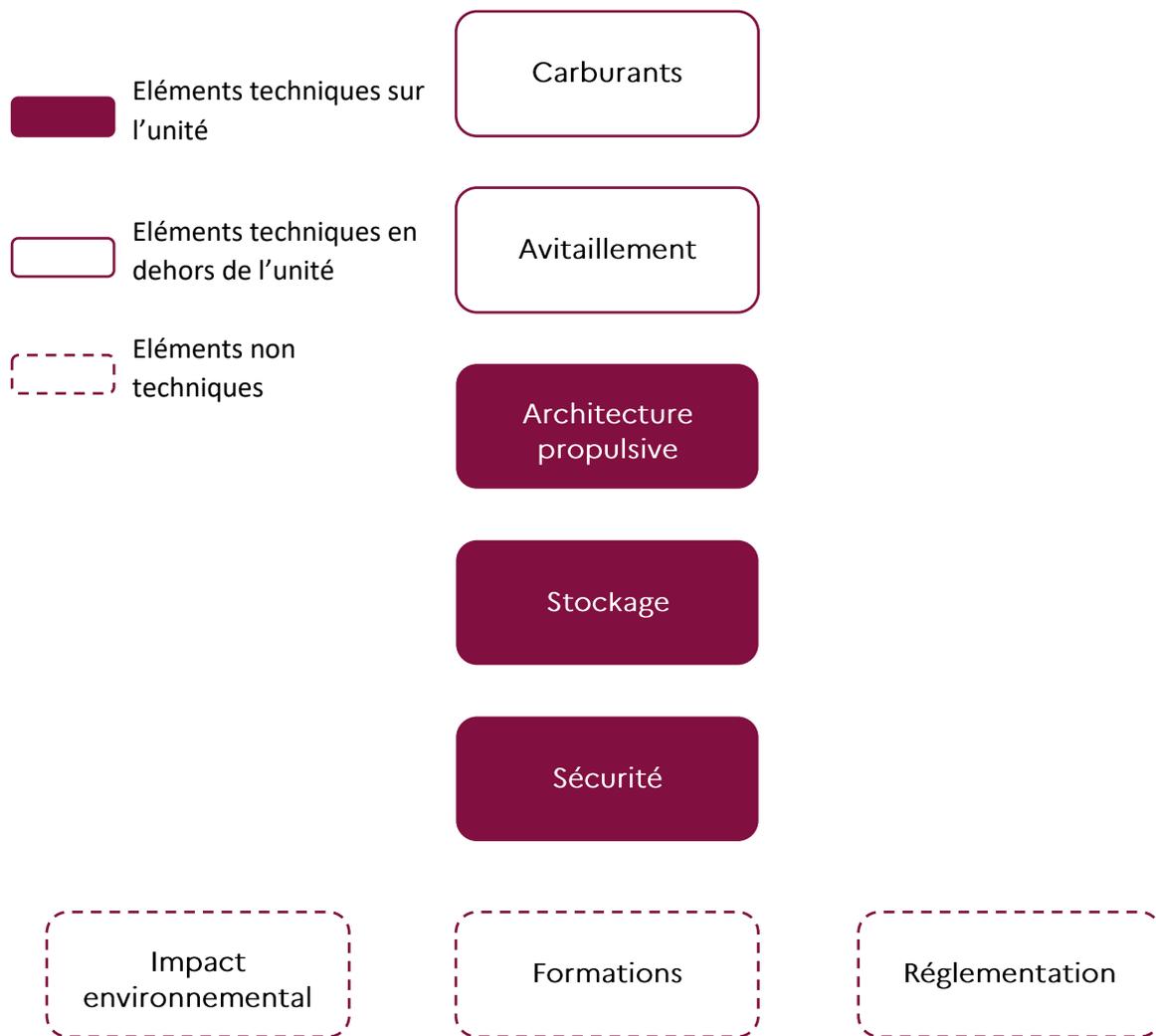


Figure 1 : Éléments techniques et non techniques considérés dans l'étude

Carburant : Réfère à l'ensemble des carburants évoqués dans cette étude, à savoir :

Tableau 1 : Carburants évoqués dans cette étude (ADEME 2023)

Carburant	Définition	Nécessite un changement de motorisation par rapport au GNR
GNR – Gazole non routier	Caractéristiques très similaires à celles du gasoil routier ou diesel mais les taxes sont moins élevées. Il s'agit du carburant conventionnel.	Non
HVO – Hydrotreated Vegetable Oils	Carburant obtenu à partir de biomasse (biocarburant). Produit à partir d'huiles végétales ou déchets retraités.	Non
XTL – X to Liquid	Réfère aux carburants de synthèse. En fonction de sa source, sa dénomination change : BTL : Produit à partir de Biomasse	Non

	CTL : Produit à partir de Charbon GTL : Produit à partir de Gaz naturel	
(bio)GNL – Gaz Naturel Liquide	Gaz naturel stocké sous forme liquide, à une température de -160°C (à pression atmosphérique). Le préfixe « bio » fait référence à son procédé de production : à partir de la méthanisation de la biomasse.	Oui
(bio)GNC - Gaz Naturel Comprimé	Gaz naturel stocké sous forme gazeux, dans des réservoirs à 200 – 250 bars. Nous présentons en détail ce carburant dans ce rapport. Le préfixe « bio » fait référence à une source de production issue de biomasse. Le bioGNC est le carburant regardé dans cette étude	Oui
H2 - hydrogène	Le dihydrogène, appelé hydrogène par abus de langage, utilise généralement un moteur électrique alimenté par une pile à combustible, transformant l'hydrogène stocké sous forme généralement gazeuse (350 à 700 bars) en électricité. Des solutions de combustions internes (moteur à explosion) existent mais restent minoritaires. L'impact environnemental de cette solution dépend de son procédé de production.	Oui
Méthanol	Le méthanol, similaire à l'hydrogène, peut être utilisé via une pile à combustible ou via un moteur explosion (en combustion interne).	Oui
Electrique	Il existe plusieurs solutions avec un moteur électrique (comme le méthanol ou l'hydrogène). Cependant, le carburant électrique réfère à la solution électrique à batterie .	Oui

L'ammoniac est également un carburant étudié dans certaine transition énergétique. Cependant, en raison de sa très forte toxicité, il n'est pas envisageable en milieu diffus. Par ailleurs, un nombre très important de carburant ne semble pas être le paysage énergétique souhaité pour demain. Des concentrations seront faites en fonction de la disponibilité de chaque carburant, son coût global, la chaine d'avitaillement, ...

Avitaillement: Réfère à l'ensemble des installations ainsi qu'à l'opération de fournir en carburant les bateaux ou navires.

Architecture propulsive: Réfère au choix du ou des groupes automoteurs (simplifié en « moteur ») ainsi qu'à leur agencement.

Stockage: Réfère à l'élément technique sur le bateau permettant la garde du carburant à bord et alimentant l'architecture propulsive.

Sécurité: Réfère à l'ensemble des éléments techniques et organisationnels à bord permettant de limiter les risques et de minimiser les pertes en cas d'incident. Il intègre notamment la signalétique et les consignes de sécurité.

Impact environnemental: Le périmètre considéré dans l'étude est précisé dans la partie « pertinence environnementale ».

Formations: Réfère principalement aux formations existantes pour l'exploitation d'unités au GNC.

Réglementation: Réfère aux réglementations en vigueur sur le transport fluvial et maritime côtier.

1.2.3. L'écosystème de la navigation fluviale et maritime côtière

La cartographie des acteurs et leurs interactions peuvent être définies de la manière suivante :

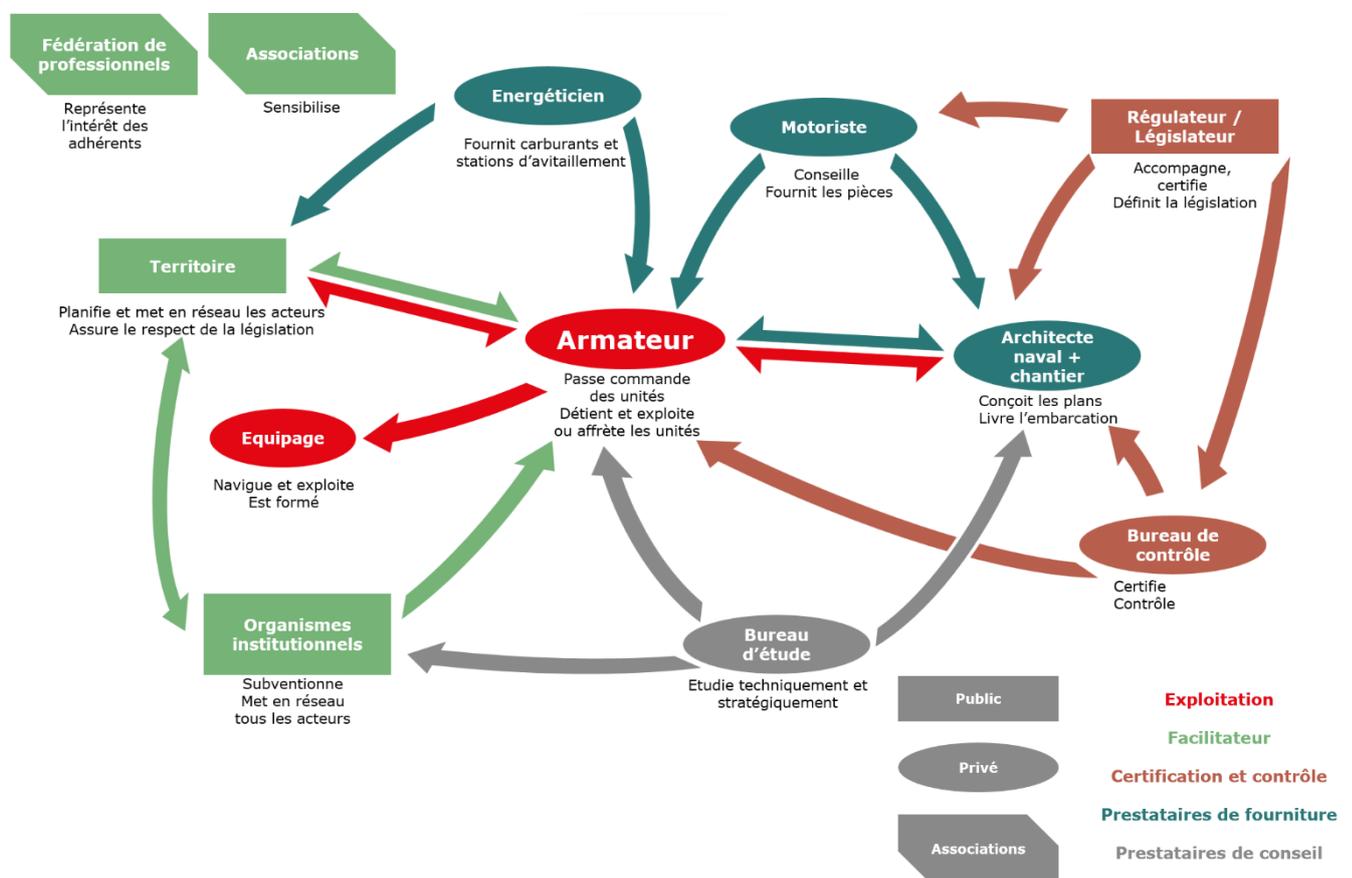


Figure 2 : Interactions des acteurs de l'écosystème fluvial et maritime côtier (Elcimai)

Afin de ne pas alourdir ce schéma, cet écosystème ne considère pas les ports ni la logistique, qui à eux seuls sont des écosystèmes complexes. Les ports sont également en interaction avec les énergéticiens, le territoire, les organismes institutionnels, les régulateurs et législateurs. Ces interactions concernent non-seulement les activités maritimes et fluviales mais également d'autres activités : industrielles, modales terrestres, ...

Bien que tous les acteurs de l'écosystème n'en fassent pas l'objet, la plupart ont été sollicités : régulateurs, législateurs, fédérations, exploitants, organismes, bureaux d'études, motoristes, énergéticiens.

Armateur	
<p>L'armateur fluvial ou maritime est le propriétaire, l'exploitant ou l'affréteur (coque nue) d'un navire ou bateau. Ces professionnels jouent un rôle essentiel dans le transport fluvio-maritime de marchandises et de passagers. Leur rôle comprend la négociation des contrats, la planification de la mobilisation des unités fluvio-maritime dans le temps, leur maintenance et la gestion de l'équipage. En tant que gestionnaires de flotte, les armateurs contribuent de manière significative au commerce international.</p>	
<p>Exemples d'acteurs</p> <div style="display: flex; flex-wrap: wrap; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center; margin: 5px;">  </div> <div style="text-align: center; margin: 5px;">  </div> <div style="text-align: center; margin: 5px;">  </div> <div style="text-align: center; margin: 5px;">  </div> <div style="text-align: center; margin: 5px;">  </div> </div>	<p>Enjeux</p> <p>La majorité des armateurs sont des artisans, et seulement 2% des armateurs sont des entreprises². Les armateurs doivent évoluer dans un contexte réglementaire et environnemental de plus en plus contraignant, tout en faisant face à une forte concurrence (principalement dans le transport de fret) et avec des moyens financiers très limités, notamment pour les artisans.</p>

Equipage	
<p>L'équipage représente tout le personnel nécessaire au bon fonctionnement du bateau/navire. Il comprend à minima le capitaine, les marins ou mariniers et les mécaniciens. Ils sont un maillon important du bon fonctionnement de l'exploitation et doivent être formés aux spécificités de maintenance, de fonctionnement et d'avitaillement.</p>	
<p>Exemples d'acteurs</p> <p>Batelier.ère</p> <p>Opérateur.rice de dragage</p> <p>Patron.ne de pêche</p> <p>Capitaine de navire</p>	<p>Enjeux</p> <p>Tous les secteurs (maritime et fluvial, transport de fret et de passagers) connaissent depuis plusieurs années un manque de personnel. De plus, le personnel navigant existant doit à la fois conserver sa compétence pour l'exploitation des unités actuelles et acquérir de nouvelles compétences pour l'exploitation de nouvelles unités utilisant de nouveaux carburants.</p>

² Selon E2F, Entreprises fluviales de France, <https://entreprises-fluviales.fr/chiffres-cles>

Organismes institutionnels

Les organismes institutionnels permettent une mise en réseau des acteurs. Ils accompagnent, financent et sensibilisent tous les représentants de la filière afin de permettre l'aboutissement de différents projets ou expérimentations.

Exemples d'acteurs



Enjeux

Les acteurs de l'écosystème n'ont pas nécessairement connaissance du champ d'actions des organismes institutionnels.

En ce qui concerne leurs enjeux :

Réglementaire : DGITM et DGAMPA suivent les armateurs dans la constitution des dossiers de dérogation permettant l'obtention du permis de naviguer au bioGNC

Financement : ADEME, VNF et certaines régions accompagnent les armateurs dans leur projet de décarbonation avec des outils de financement tel que les CEE, le PAMI...

Fédérations de professionnels

Les fédérations de professionnels informent leurs adhérents des actualités et promeuvent des synergies entre différents acteurs. Ils animent la filière et s'assurent du respect des intérêts de ses adhérents lors des comités stratégiques et réglementaires qui dessinent le cadre de demain. Ils peuvent représenter des armateurs ou des acteurs multiples d'une même filière.

Exemples d'acteurs



Enjeux

Les actions initiées par les fédérations de professionnels sont dépendantes des adhérents et notamment du président élu, mais aussi des moyens financiers et humains dont disposent ces structures. La fédération représente la vision commune de ses adhérents auprès des régulateurs ou organismes institutionnels.

Associations spécialisées

Les associations spécialisées facilitent les échanges d'informations, informent le grand public et accompagnent les collectivités dans la réalisation de projets. Elles rassemblent des personnes physiques et morales concernées par les enjeux énergétiques, maritimes et fluviaux.

Exemples d'acteurs



Enjeux

Les associations sensibilisent à la fois les professionnels et le grand public. Afin de mener l'ensemble de leurs projets, les associations sont généralement tributaires de subventions publiques, parfois insuffisantes.

Motoristes

Les motoristes sont spécialisés dans la conception, la fabrication, la maintenance et la distribution de moteurs, de systèmes de propulsion et de composants associés. Leur expertise joue un rôle crucial dans le bon fonctionnement des bateaux et navires. Ils sont à l'initiative de la réflexion de conception et de marinisation de moteurs routiers tout en s'assurant des respects de la réglementation et de la sécurité spécifique au secteur fluvial et maritime.

Exemples d'acteurs



Enjeux

La petite taille du marché fluvial et maritime côtier, en comparaison au secteur routier, est souvent peu attrayante pour les motoristes. De plus, le contexte réglementaire incertain actuel, freine la recherche et développement de moteur gaz marinisé: l'apparition d'une réglementation pouvant rendre leur modèle élaboré non-conforme.

Energéticien

L'énergéticien a pour rôle principal de faciliter l'approvisionnement en énergie. En fonction des réseaux existants, des infrastructures bord à voie d'eau et de la densité locale de sources de production, l'avitaillement pourrait être direct et nécessiter seulement l'installation d'une station de compression ou indirect à travers la recharge par bateau/navire, camion ou le remplacement de bouteilles.

Exemples d'acteurs



Enjeux

L'énergéticien intervient dans plusieurs filières. Ses activités économiques sont affectées par les changements de toutes les filières de transport et le transfert modal. Mais il est essentiel pour tout projet de motorisation avec un carburant alternatif et doit donc être impliqué dès le début du projet.

1.3. Le bioGNV, carburant alternatif au gazole

Gaz Naturel pour Véhicules - GNV

Il s'agit du terme générique pour les technologies de moteurs fonctionnant au gaz naturel (méthane), qui peut être stocké sous forme gazeuse ou liquide. Il est utilisé comme carburant dans les véhicules. Dans sa forme bioGNV, il est aujourd'hui produit par des méthaniseurs (par procédé de digestion anaérobie) et est principalement utilisé dans le secteur routier.

Gaz Naturel Liquéfié - GNL

Il s'agit de la forme liquide du GNV refroidi à -162°C. Ce rapport ne l'étudie pas en détail.

Gaz Naturel Comprimé - GNC

Il s'agit de la solution qui permet une utilisation sous forme gazeuse, le gaz étant initialement comprimé et stocké généralement à 200 ou 250 bars (pression dépendant des usages). Nous étudions cette forme.

Bio GNV/GNL/GNC

Utilisation de biométhane à la place du gaz naturel fossile. Ce gaz renouvelable et bas carbone est issu de méthaniseur (par procédé de digestion anaérobie) et pourra dans l'avenir être obtenu par d'autres procédés (pyrogazéification, gazéification hydrothermale, etc).

ATTENTION éléments de langage

Les termes « gaz » et « GNC » font référence aux technologies. Par exemple pour évoquer les moteurs gaz ou moteurs GNC

Le terme « bioGNC » désigne le carburant bioGNC. Par exemple pour évoquer l'impact environnemental du bioGNC.

1.3.1. Distinction entre GNV et bioGNV

Le gaz naturel pour véhicules (GNV) est un gaz naturel constitué à environ 97% de méthane et utilisé comme carburant pour les véhicules à moteur. Le GNV peut être d'origine fossile ou renouvelable.

- Le **GNV d'origine fossile** est obtenu par l'extraction de gaz à partir de gisements gaziers fossiles, qui sont des mélanges gazeux d'hydrocarbures principalement constitués de méthane. Le gaz est extrait de la roche réservoir avant d'être traité et épuré. En France, l'extraction locale de gaz naturel est limitée et représente une quantité marginale. En 2023 et suite à la guerre en Ukraine, **environ 41% du gaz consommé en Europe en 2023 est importée sous forme liquéfiée (GNL), transporté par méthaniers.**
- Le **GNV d'origine renouvelable** est obtenu par l'utilisation de ressources renouvelables, comme certaines biomasses liquides ou sèches. Ce processus conduit à la production d'un gaz totalement miscible dans les réseaux de gaz naturel. Le gaz renouvelable peut être utilisé pour tous les usages du gaz naturel, comme le chauffage, la cuisson, les procédés industriels, ou la mobilité. **Pour ce dernier cas d'usage, on parle de bioGNV ou de biométhane carburant.**

Le biométhane désigne tout gaz injectable dans le réseau issu de biomasse, ce qui recouvre la méthanisation - seule filière de production industrielle à complète maturité à ce jour - et la gazéification de biomasse. Le contenu carbone du bioGNV produit et utilisé en France est 5 fois moins important que celui du GNV fossile, avec une approche du puits à la roue[1]. Issu du traitement du biogaz avant injection dans le réseau de gaz, le biométhane est un gaz renouvelable.

L'infographie ci-dessous décrit les processus de production du biogaz, biométhane et bioGNV par méthanisation :

1. La méthanisation des intrants (déchets agricoles, industriels, boues d'épuration, ...) donne un digestat (résidus de ces déchets) ainsi que du biogaz, composé principalement de CH₄ et de CO₂. À cette étape, le biogaz peut déjà être valorisé, en chaleur ou en électricité.
2. Le processus d'épuration permet ensuite d'éliminer le CO₂ du biogaz et d'obtenir du biométhane, avec a minima 90% de CH₄.
3. Le biométhane produit peut ensuite être injecté dans le réseau de gaz, après avoir été contrôlé, et odorisé. Il sera consommé, valorisé en chaleur, électricité ou carburant (bioGNV). La quantité de biométhane injectée est mesurée et comptabilisée en TWh.

D'autres procédés ont vu le jour comme la pyrogazéification, qui arrive bientôt au stade de développement industriel, la gazéification hydrothermale ou la méthanation (power-to-methane).

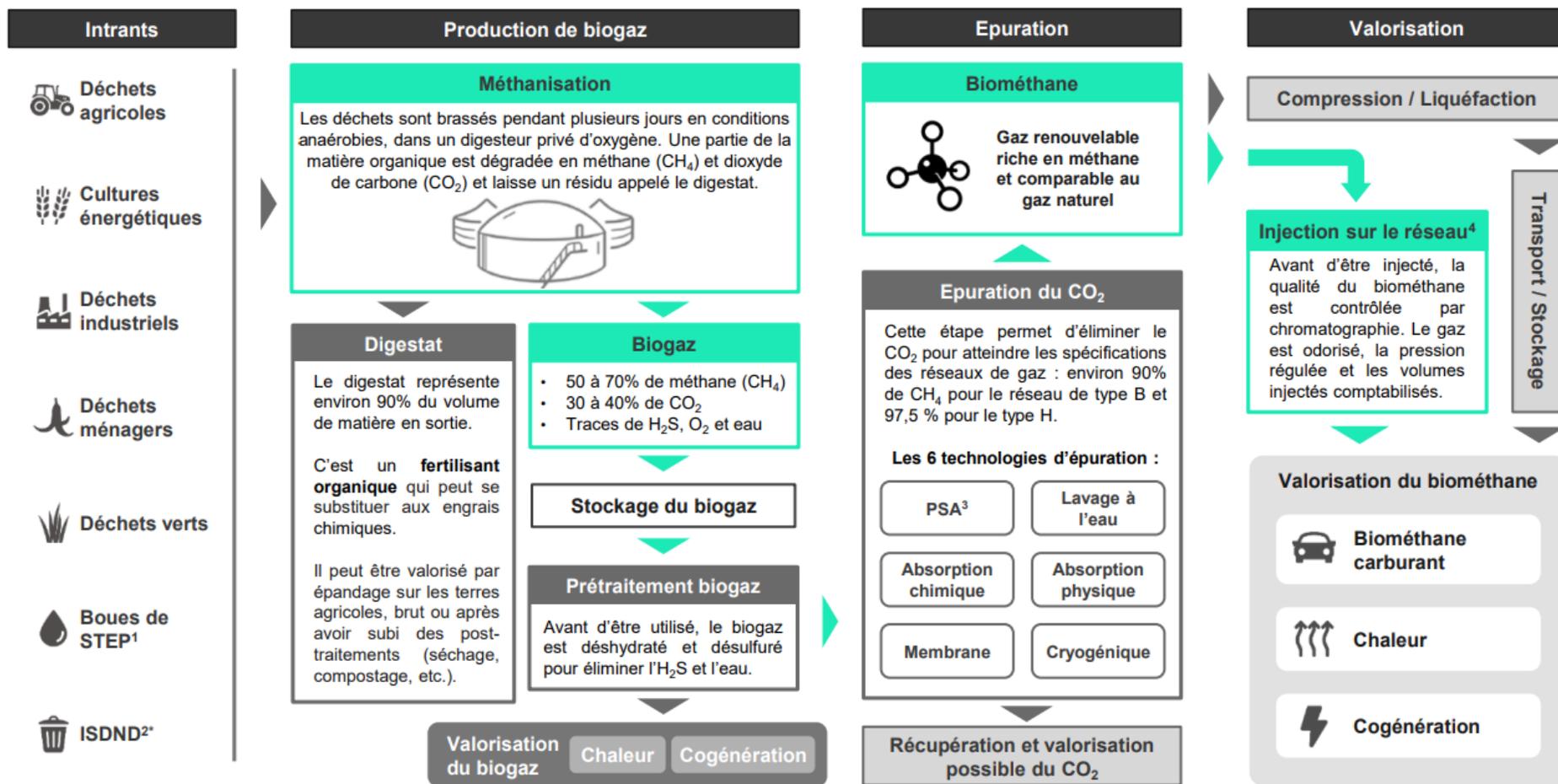


Figure 3 : Chaîne de valeur de la production de biogaz et biométhane (infographie Sia Partners)

(1) STEP : Station d'Épuration des eaux usées. (2) ISDND : Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux. (3) PSA : Pressure Swing Absorption. (4) En France, le modèle de l'injection est prédominant par rapport à la valorisation directe hors réseaux

1.3.2. Distinction entre GNC et GNL

Le GNV existe sous deux formes principales :

Gaz Naturel Liquéfié GNL	Gaz Naturel Comprimé GNC
<ul style="list-style-type: none">• Gaz refroidi à moins de -163°C pour le transformer en liquide, permettant de transporter de plus grandes quantités.• Nécessite des équipements spéciaux pour éviter les risques de brûlures lors de la manipulation et des dispositifs de calorigéage pour limiter le réchauffement. Approvisionnement des stations par camion.• Plus cher que le GNC d'environ 20%.• Risques liés à l'immobilisation prolongée du matériel : possible expansion et gazéification du liquide ("boil-off"), nécessitant des soupapes de sécurité qui libèrent le gaz dans l'atmosphère.	<ul style="list-style-type: none">• Stockage à température ambiante, sous haute pression (200 bars à 250 bars) dans des réservoirs spécifiques.• Possibilité de raccorder les stations directement au réseau de distribution gaz-facilitant leur approvisionnement.• Carburant et équipements généralement moins cher que le GNL• Risques liés à l'exploitation en zone ATEX. En France et en Europe, la pression dans les stations (compression / stockage) est de 250 ou 300 bars.

Cette étude se concentre sur la solution bioGNC : usage de biométhane dans des moteurs gaz et stockage sous forme comprimée.

1.3.3. Etat actuel de la production et distribution du biométhane

A la fin de l'année 2023, la France comptabilisait 652 unités de méthanisation pour une capacité d'injection de 9 TWh de gaz annuellement. Les intrants d'origine agricole (résidus d'agriculture, CIVE, effluents et cultures dédiées) sont les principales ressources mobilisées pour la production de biométhane, et constituent la très grande majorité du gisement mobilisable.

Dans le secteur des transports, plus de 300 stations GNV sont disponibles, avec 60% offrant du bioGNV en 2022 et 35,9% de la consommation de GNC étant du bioGNC, visant 100% à l'horizon 2033.

En 2023, ce sont 652 installations qui ont injecté du biométhane pour 9,1 TWh, soit une augmentation de 31% par rapport à l'année précédente.

La plupart des scénarios de prospective (ADEME, SNBC/ PPE, Territoire ajusté GRTgaz/GRDF, Negawatt) prévoient une diminution des consommations de gaz d'environ 50% à horizon 2050, au profit de la baisse de consommation et au remplacement par d'autres énergies (comme l'électricité), ainsi qu'un taux de gaz renouvelable de 80 à 100% à horizon 2050 (contre 2,4% en 2023). Les usages gaz en mobilité sont les seuls à augmenter, et pourraient représenter jusqu'à 30% de la consommation totale de gaz à horizon 2050 (Scénario Territoire ajusté GRTgaz/GRDF, 2022). [2]

Ces scénarios de décarbonation du mix gazier s'appuient tous sur un « socle » de méthanisation aux alentours de 130 TWh (contre une capacité de production de 11,8 TWh fin 2023), complété dans des proportions plus ou moins élevées par des procédés à ce jour moins matures (au stade d'expérimentation) : pyrogazéification, gazéification hydrothermale et Power-to-méthane (électrolyse et méthanation).

La consommation de GNV pour les véhicules, c'est à dire l'usage véhicule du gaz, représentait 4,1 TWh en 2022 et est estimée à 50 TWh en 2050. Les régions les plus consommatrices sont actuellement l'Île-de-France (35%), l'Auvergne-Rhône-Alpes (11%) et les Hauts-de-France (10%)³. La majorité du GNV est aujourd'hui consommée par les bus, les bennes à ordures ménagères

³ Selon l'Open Data Réseaux Energies

et les poids lourds. En France, 50% des bus vendus fonctionnent au bioGNV/GNV, et 25% des bennes à ordures⁴.

Il est fondamental que la production de biométhane progresse au même rythme que l'augmentation des besoins en gaz pour les transports, les bénéfices environnementaux du bioGNV étant bien plus importants que ceux du GNV (moins 80% d'émissions de CO₂ grâce au bioGNV, contre 15% avec le GNV, par rapport au gazole)⁵.

Avertissement : le bioGNV et le verdissement du réseau

Actuellement, le biogaz injecté dans le réseau ne représente que 3% de l'ensemble du gaz distribué. Le gaz physiquement disponible est donc, à 97%, du gaz naturel et non du biogaz.

Ces chiffres sont à mettre en perspective avec la part de BioGNC (comptabilisé via des GO) en France qui atteint 39% du GNC consommé et presque 30% sur l'ensemble du GNV, GNL compris (chiffres ODRE).

Considération pour la présente étude : Les études relatives au « train bioGNV » et au « bateau bioGNC » partent de l'hypothèse que le réseau de gaz, susceptible d'approvisionner les trains et les bateaux en (bio)gaz, sera composé à 100% de biogaz d'ici 2050.

Le rapport Perspectives Gaz de 2022 estime que la consommation totale de gaz naturel pourra être couverte par des sources de gaz renouvelables et à faible teneur en carbone d'ici à 2050. **Notons néanmoins que les scénarios Transition(s) 2050 publiés par l'ADEME estiment que le biogaz couvrira au maximum 88% de la consommation de gaz en 2050** (suffisant pour atteindre la neutralité carbone).

Les régions **Nouvelle Aquitaine, Auvergne Rhône Alpes, Grand Est et Occitanie** ont les plus hauts potentiels de production de biométhane.

Plusieurs mécanismes de traçabilité du biogaz existent :

- Achat de Garanties d'Origine (GO). Notons que depuis 2022, il n'est plus possible de comptabiliser les GO dans les bilans GES (les GO peuvent néanmoins être mentionnées dans le bilan).
- **Biogas Purchase Agreement (BPA)**
- Autoconsommation

Messages clés de l'ADEME :

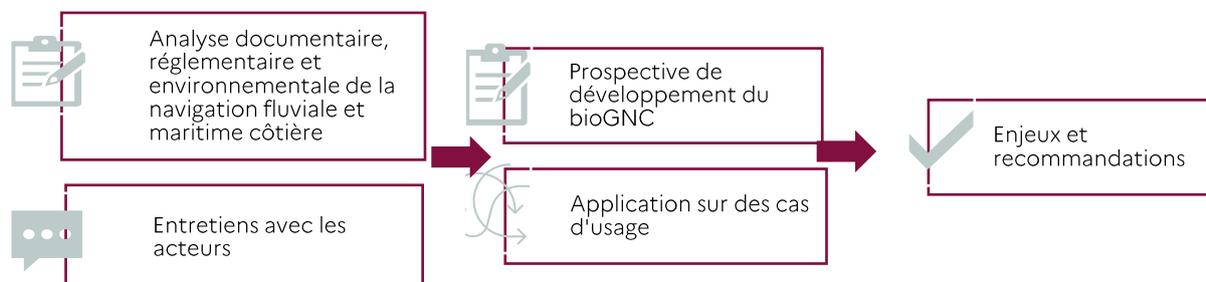
- **Le biogaz est une solution de décarbonation du mix énergétique nécessaire** à l'atteinte de la neutralité carbone en 2050.
- **Priorité dans le secteur des transports : (1) sobriété, (2) report modal, (3) décarbonation**
- **Priorité dans le secteur industriel (énergéticiens) : décarboner le gaz** (remplacer le gaz naturel par du biogaz dans le réseau). L'ADEME soutient la méthanisation.
- **L'ADEME encourage la consommation directe** depuis le site de production de bioGNV (L'achat de GO n'est pas préconisé par l'ADEME pour qu'une entreprise verdisse son activité).

⁴ Syndicat des Energies Renouvelables (2023). Panorama des gaz renouvelables 2022.

⁵ GRDF. (2023). FAQ BioGNV/GNV.

1.4. Méthodologie de l'étude

Les travaux ont été articulés de la manière suivante :



1.4.1. Analyse documentaire, réglementaire et environnementale



En bref

- Plus de 60 documents analysés
- De 17 acteurs différents : associations, fédérations, architecte naval, bureaux d'études, commissions, établissement public, etc.
- Principalement des études techniques, réglementaires et des scénarios de développement de la navigation fluviale et maritime côtière

L'utilisation du bioGNC dans le transport fluvial et maritime côtier est un sujet récent et d'actualité. Ainsi, cette étude est menée en parallèle d'autres études en cours. L'analyse documentaire s'est donc faite tout au long de la mission. Les objectifs de cette analyse sont d'identifier :

- Des travaux nationaux et européens similaires visant à remotoriser un bateau ou navire au bioGNC,
- Des éléments permettant de construire et d'alimenter les réflexions autour **des éléments techniques à bord, hors unités et les éléments non techniques.**

Parmi les documents structurants à notre étude, nous pouvons notamment citer :

Tableau 2 : Principaux documents utilisés dans l'étude

Auteur	Titre	Année
VNF	AviCafe[3]	2023

2C Consulting	Disponibilité des moteurs gaz[4]	2023
VNF	FLUENT[5], [6]	2022
ADEME	Impact air & climat transport fluvial[7]	2023
ACANOR / France Pêche Durable / 2C	PêGaz : définition d'un cahier technique pour un navire de pêche au bioGNC[8], [9]	2024 (en cours)
SEGULA TECHNOLOGIES	Rapports d'études liés au projet Green Deliriver[10], [11], [12], [13]	2022
ShipST	Rapports études de faisabilité de remotorisation[14], [15], [16]	2022

La liste des références bibliographiques se trouve en Annexe.

1.4.2. Entretiens avec les acteurs



En bref

- 18 acteurs consultés
- 7 typologies d'acteurs représentés, aux visions, attentes et implications différentes
- plus de 20 entretiens réalisés

La réalisation d'entretiens auprès d'acteurs des filières maritime côtière et fluviale a permis d'entendre différentes opinions, de collecter des données, et de recenser les freins et leviers à considérer pour l'étude. Les éléments questionnés avec les acteurs concernaient : les enjeux réglementaires, les pratiques et usages, les projets et études en cours, la vision de la transition énergétique du fluvial et maritime côtier, la place du bioGNC (production, motorisation, infrastructure d'avitaillement, soutage et stockage à bord).

Les enseignements tirés des entretiens sont intégrés au rapport. La matrice Atout Force Opportunité Menace, rappelant l'ensemble des enseignements est présente en Annexe.

2 Régulateurs / législateurs	1 Fédération	3 Exploitants	3 Organismes	4 Bureaux d'études	2 Motoristes	3 Énergéticiens
	 	  	 		 	 

 <p>MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET DE LA COHÉSION DES TERRITOIRES <i>Écologie Solidarité Territoires</i></p>			 <p>AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE</p>	 <p>SEGULA TECHNOLOGIES LMG MARIN ship-ST</p>		 <p>Enjeux et recommandations</p>
---	--	--	---	---	--	--

Figure 4 : Détails des acteurs – Entretiens réalisés

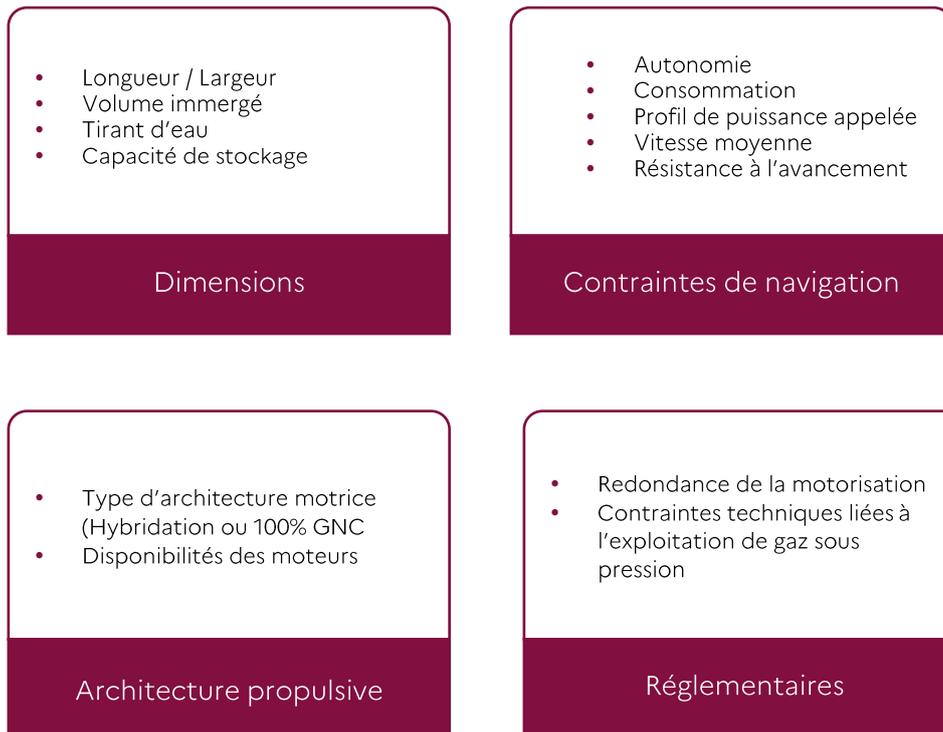
1.4.3. Etude de cas d'usage

L'étude de cas d'usage vise à étudier de manière approfondie et spécifique l'utilisation du bioGNC sur 3 typologies de bateaux distinctes. Le parc des unités fluvio-maritime est très hétérogène en termes de dimension et d'usage. Ainsi, et par définition, les résultats technico-économiques présentés au chapitre 2.7 ne sont valables que dans les conditions des cas d'usage précisés ; les cas d'usage sont des applications de l'analyse technico-économique permettant de montrer les avantages et inconvénients afin d'en tirer des conclusions à plus grande échelle.

Nous choisissons comme unités :

- **Le pousseur** : ce bateau est conçu pour du poussage de convois de barge. Cette unité fluviale de transport de fret, ne transporte pas ou très peu de marchandise sur le pousseur : l'ensemble des marchandises est contenu dans les barges.
- **L'automoteur** : péniche de transport fluvial dotée d'un moteur et se déplaçant par ses propres moyens. Cette unité de transport de fret transporte l'ensemble de marchandise sur le bateau.
- **Le bac fluvio-maritime** : cette unité est conçue pour transporter principalement des personnes et des véhicules, entre deux rives / îles. Le bac navigue sur les fleuves et en maritime côtier.

Nos études de cas d'usage présenteront les conditions techniques des équipements constitutifs des unités. Ces conditions techniques sont notamment déterminées selon plusieurs variables :



Les contraintes liées à l'avitaillement seront étudiées spécifiquement dans la partie dédiée.

1.4.4. Perspectives de déploiement

Les perspectives de déploiement du bioGNC dans le transport fluvial et maritime côtier visent à étudier de manière grossière le potentiel de déploiement du bioGNC à grande échelle, en France métropolitaine, dans ces secteurs. Les hypothèses permettant l'élaboration de perspectives de déploiement pour le transport fluvial et maritime côtier sont présentées au chapitre 3. Trois scénarios de déploiement ont été élaborés : prudent, intermédiaire et haut, aux horizons 2040 et 2050.

2. Le bioGNC dans le secteur fluvial et maritime côtier

Synthèse des enseignements :

- Le bioGNC est principalement adapté pour des flottes captives ou semi-captives, avec une vitesse de navigation régulière et modérée.
- Les unités de moyennes et grandes tailles sont plus adaptées étant donné l'espace important que prend le stockage du bioGNC à bord.
- Les unités pouvant être pertinentes sont : les pousseurs et automoteur de moyenne et grande taille, les navires de pêche artisanale de grande taille (supérieur à 20m) avec des sorties inférieures à 3 jours, les bacs sans transport de véhicule et les navires de service.
- Il est nécessaire de repenser et optimiser la chaîne énergétique qu'importe le vecteur énergétique choisi. Chaque unité étant différente, il sera nécessaire de mener une étude spécifique plus approfondie.
- Le réseau d'avitaillement fluvial bioGNC n'est actuellement pas développé. Il est nécessaire d'étudier ce sujet le plus tôt possible et en amont de chaque projet.
- L'exploitation d'unité au gaz comprimé nécessite de former l'équipage à bord à l'utilisation et aux mesures de sécurité associées à ce carburant. Ces formations, à destination des équipages, sont aujourd'hui déjà existantes.
- Le surcoût total pour le développement d'une solution bioGNC par rapport à une solution fioul est de l'ordre de 400k€ à 2 000k€ en fonction du type d'unité et de l'architecture propulsive choisie. Par ailleurs, certains coûts d'études et d'homologation peuvent être amortis (entre 500k€ et 1 000k€), notamment pour la recherche et développement de moteur homologué et marinisé.
- Bien que les unités fluviales ne soient aujourd'hui pas soumises aux Zones à Faibles Emissions (ZFE), les solutions en hybride électrique ou bioGNC permettent de se préparer à d'éventuelles futures évolutions.
- Les solutions au bioGNC pour le transport fluvial et maritime côtier sont une possibilité industrielle à moyen terme.

2.1. La synthèse des projets et démonstrateurs

Les principales études et les principaux projets d'expérimentation de bateaux et navires au bioGNC sont recensés dans le tableau suivant.

Tableau 3 : Synthèse des bateaux et projets de bateau en bioGNC

Nom	Type de projet	Statut projet	Bureaux d'étude	Motorisation	Commentaire
Le Bélier	Remotorisation - Pousseur	Etude terminée	Ship ST	100% GNC	<p>L'étude de faisabilité, commandée par VICAT, a conclu sur la possibilité de remotoriser le bateau avec une propulsion 100% GNC, avec la possibilité de recharger tous les deux jours ou toutes les semaines. Le coût de la remotorisation a été estimé entre 1,2M€ et 1,5M€, en fonction de la taille des bouteilles de stockage.</p> <p>Cependant, un changement de la stratégie du groupe opérant le bateau, a mis le projet en stand-by et cela, indépendamment des résultats technico-économiques de l'étude de remotorisation au bioGNC</p>
Amphytrite	Construction neuve – Navette côtière	Etude en cours	EXID	Hybridation série GNC – électrique	<p>Lauréat de l'appel à projet GRDF de 2023, le projet vise à la construction d'une navette côtière de transport de passagers, en hybride électrique et GNC. La navette comprendrait également une production électrique à bord à l'aide de panneaux photovoltaïques et d'éoliennes.</p> <p>La livraison de l'étude d'analyse de risques liés à la propulsion au BioGNC sur le navire est prévue courant 2024.</p>
MethaValo 92	Remotorisation – Automoteur	Etude en cours	SEGULA Technologies	100% GNC	<p>Lauréat de l'appel à projet GRDF de 2023, le projet vise à la remotorisation de deux automoteurs pour le transport de digestats liquides de l'usine de méthanisation entre l'unité de Gennevilliers et le port de Limay.</p> <p>Selon le planning prévisionnel, la mise à disposition des bateaux est prévue pour 2026.</p>

RiverCat-Alternat	Remotorisation – Freycinet	Etude en cours	River Cat	100% GNC	Lauréat de l'appel à projet GRDF de 2023, le projet vise à la remotorisation du Freycinet de croisière de passagers, appartenant à l'association Alternat. River Cat accompagne l'association afin de convertir son bateau au bioGNC. L'étude en est à ses débuts, et un premier livrable de solution technique est attendu pour 2024.
RivesEnRêves	Remotorisation – Freycinet	Etude en cours	Lebéfaude	Hybridation série GNC - électrique	Lauréat de l'appel à projet GRDF de 2023, le projet vise à la remotorisation du bateau de transport de passagers, appartenant à Rives En Rêves. La mise en navigation du bateau remotorisé est prévu pour 2024.
Green Deliriver	Remotorisation – Automoteur	Etude en cours	SEGULA Technologies	Hybridation série GNC - électrique	Projet lancé en 2018 et toujours en cours. Le protocole de dérogation pour navigation fluviale au bioGNC a été validé par la CCNR. Le bateau Sydney de la société Coalis, a obtenu le permis européen de naviguer (mars 2023) pour naviguer au bioGNC. Le chantier de remotorisation devrait commencer en 2024 avec pour objectif d'avoir une barge exploitable en 2025.
Androméda	Remotorisation – Automoteur	Etude finalisée	SEGULA Technologies	Hybridation série GNC - électrique	L'étude, réalisée en 2021 pour GRDF au regard de l'étude sur les possibilités de remotorisation des bateaux de la flotte parisienne par la Communauté portuaire de Paris, a conclu sur la faisabilité d'une remotorisation avec une propulsion hybride électrique / bioGNC en considérant une propulsion 100% électrique dans Paris, et 100% biogaz en dehors de Paris avec une autonomie de 4 jours. Le coût de la remotorisation a été estimé à 1,9M€ avec une économie sur le coût énergétique de 40% du coût carburant actuel. A ce jour, la remotorisation de l'Andromeda au bioGNC n'a pas été annoncée.
Grand Pavois	Remotorisation – Bateau de croisière	Etude finalisée	SEGULA Technologies	Hybridation série GNC - électrique	L'étude, réalisée en 2021 pour GRDF au regard de l'étude sur les possibilités de remotorisation des bateaux de la flotte parisienne par la Communauté portuaire de Paris a conclu sur la faisabilité d'une remotorisation d'un

					<p>bateau de croisière, entre les ports de Bercy et Orsay. avec une propulsion hybride électrique / bioGNC en privilégiant une navigation tout électrique dès que possible. Le coût de la remotorisation a été estimé à 1,2M€ avec une économie sur le coût énergétique allant de 40% à 55% du coût carburant actuel.</p> <p>A ce jour, la remotorisation du Grand Pavois au bioGNC n'a pas été annoncée.</p>
Pousseur GNC	Construction neuve - Pousseur	Etude en cours	SEGULA Technologies	Hybridation série GNC - électrique	Il s'agit d'une étude du projet Green Deliriver. Après la motorisation de l'automoteur Sydney, l'objectif est de construire un pousseur neuf hybride au bioGNC.
Slop Normandie	Construction neuve - Freycinet	Etude en cours	Ship-ST	Hybridation série GNC - électrique	<p>Le bateau-citerne SLOP Normandie fonctionne toute l'année sur la Seine entre Paris et le Havre. Il a vocation à transporter du vrac liquide et des déchets solides.</p> <p>L'avant-projet pour la remotorisation du bateau prévoit un fonctionnement hybride avec des batteries rechargeables alimentées par des panneaux solaire et deux groupes électrogènes au bioGNC. Le projet impliquerait le motoriste Europe Service (discussions et échanges déjà entamées). L'autonomie visée est de 5 à 15 jours (cycles journaliers de navigation maximaux ou cycles journaliers de navigation minimaux).</p>
PêGaz	Construction neuve - Chalutier	Etude en cours	ACANOR	100% GNC	<p>Etude portée par ACANOR et soutenue par France Pêche Durable et Responsable, étudiant les conditions techniques de faisabilité et d'exploitation d'une propulsion gaz, par gamme de navire. L'objectif est de tirer des conclusions pour l'ensemble de la filière pêche sur l'utilisation du bioGNC dans les navires de pêche et sur les conditions préalables (techniques, réglementaires, financiers, ...).</p> <p>Les premiers livrables sorties en décembre 2023 indiquent une vraie faisabilité technique pour une propulsion au bioGNC, principalement pour les arts dormants de plus de 20,5m.</p>

					La fin de l'étude est prévue courant 2024.
Bacs de Seine	Remotorisation – Bacs fluviaux et maritimes	Etude en cours	2C Consulting et Ship ST	Bacs fluviaux : 100% GNC Bacs maritimes : Hybridation série GNC - électrique	En 2022, le département de la Seine Maritime a lancé une étude pour évaluer la faisabilité de remotoriser au bioGNC ses bacs fluviaux-maritimes. Les conclusions de l'étude ayant donné de bons résultats, une première expérimentation avec la remotorisation du bac n°20 est prévue fin 2024. Selon ces résultats, la construction d'un bac maritime et de deux bacs fluviaux pourraient être envisagés en 2025-2027.
Navire de Baltic Workboats AS	Construction neuve – Navire	En construction	Chantier naval Baltic Workboats AS	Hybridation série GNC - électrique	Le chantier estonien Baltic Workboats AS a signé, en 2024, un contrat à 22 millions d'euros pour la conception et la construction d'un nouveau navire polyvalent pour la flotte d'Etat estonienne (Riigilaevastik). Ce navire, qui devrait mesurer 40 mètres de long, par environ 10 mètres de large, utilisera du biométhane ou un parc de batteries pour sa propulsion. La conception et la construction du navire devrait durer 26 mois, pour une livraison programmée au premier trimestre 2026.
Fish2EcoEnergie	Remotorisation - Chalutier	En exploitation	NC	Dual fuel GNC / Fioul	Le moteur dual fuel GNC / Fioul a été installé sur le bateau en 2015. Cependant, il n'a jamais fonctionné au GNC à cause de l'avitaillement difficile et les contraintes de volume d'emport du carburant (empiétant sur l'espace disponible en cale). Il est aujourd'hui exploité uniquement au fioul.
Navettes Amsterdam	Construction neuve – Navettes de tourisme	En exploitation	NC	100% GNC	A Amsterdam, une vingtaine de bateaux touristiques fonctionnent sur les canaux avec une dérogation de zone restreinte pour le GNC. Total Energies opère une station de recharge permettant de faire le plein de deux bateaux en même temps.

Pour conclure, des bateaux de passagers naviguent déjà au bioGNC, au Pays-Bas, avec une dérogation de zone restreinte. Du côté Français, le premier démonstrateur de bateau de transport de marchandises au bioGNC a obtenu la dérogation européenne en 2023. De plus, plusieurs études sont menées pour identifier des cas d'usage pertinents et des projets émergent autour de bacs fluvio-maritimes, transport de marchandises et de bateau de manœuvre.

2.2. La vision en synthèse des avis des fournisseurs de carburant

Les 5 principaux freins suivants ont été identifiés[3], tels qu'ils sont perçus par les fournisseurs de carburant :

1. **ECONOMIQUE** : L'investissement nécessaire à l'installation des stations d'avitaillement (aussi bien côté client que côté fournisseur) rend les fournisseurs de carburant sceptiques quant au succès du déploiement du bioGNC dans le secteur fluvial. La plupart des bateliers ne sont pas prêts à payer plus cher leur carburant, et ceux qui sont prêts à faire l'effort estiment qu'une augmentation de maximum 10% serait acceptable.
2. **TECHNOLOGIQUE** : Les fournisseurs de carburant se demandent s'il sera techniquement possible d'adapter les bateaux au bioGNC. Le manque de retour d'expérience spécifique à la navigation fluviale et maritime interroge également sur l'intégration des aspects sécuritaires, bien que maîtrisés dans le transport routier.
3. **LOGISTIQUE** Les fournisseurs de carburant estiment nécessaire de comprendre l'aménagement des lieux pour l'installation de stations dédiées, leur gestion et la coordination avec les modes d'avitaillement conventionnels.
4. **REGLEMENTAIRE** Les fournisseurs de carburant estiment que la transition énergétique passe en premier lieu par l'adaptation de la réglementation. Ils estiment également nécessaire d'encadrer l'ensemble des pratiques d'avitaillement fluvial pour assurer la pérennité et la cohérence de la transition énergétique du secteur.
5. **PSYCHOLOGIQUE** Selon les fournisseurs, les carburants gazeux sous pression et les précautions à prendre pour leur usage peuvent susciter des inquiétudes chez les bateliers et une défiance vis-à-vis de leur acceptation à venir. Un travail pédagogique et d'information est nécessaire.

2.3. Evaluation environnementale comparative du bioGNC

A retenir :

- Le bioGNC est pertinent d'un point de vue environnemental, il permet la diminution d'environ 80% d'émissions de gaz à effet de serre du puit à la roue. Les infrastructures d'avitaillement et les éventuelles fuites de méthane ne sont pas prises en compte.
- La pertinence du bioGNC dans le transport fluvial et maritime côtier s'explique principalement par sa capacité à décarboner le secteur, à partir d'une technologie déjà existante. L'utilisation du GNC (issu de gaz fossile) est à proscrire.
- En propulsion 100% gaz, aucun matériau rare ou critique ne semble nécessaire (contrairement aux batteries). Cette allégation sera validée ou invalidée par GRDF à l'issue de l'étude en ACV en cours, sur la production de ce carburant.
- L'ensemble des études environnementales ont été menées à partir de ratios et mesures issues du transport routier, sans mesures d'échappement réelles.
- La transition énergétique des transports est multi carburants. Chaque carburant alternatif au gazole ayant des avantages, des inconvénients et des zones de pertinence (techniques, économique et géographique).

2.3.1. Les sources de données utilisées

L'évaluation environnementale s'appuie sur la base Empreinte® ADEME, ainsi que sur les études spécifiques au secteur fluvial et maritime côtier[5], [6], [7], [10], [11], [12], [14], [16], [17], [18], [19].

Parmi les études recensées, l'étude « FLUENT Rhône Saône » menée par VNF[6], compare le bioGNC et le GNR à d'autres carburants alternatifs et cela, pour les émissions à l'échappement, pour le stockage et pour la production du carburant. Cependant les résultats présentés sont au format graphique et comparent la forme non renouvelable du GNC en l'état actuel. Le bioGNC n'est regardé que par projection à 2050. A noter que l'AFBE (Association Française du Bateau Electrique) mène actuellement une ACV (Analyse de Cycle de Vie), co-financée par l'ADEME, sur une unité fluviale prenant en compte le groupe motopropulseur, le réservoir et le vecteur énergétique.

Les autres études considèrent principalement les émissions à l'échappement en se basant sur les pollutions spécifiques établies par la norme EMNR.

Les impacts suivants n'ont, de manière générale, pas été étudiés en profondeur :

- Les consommations de bord et de manœuvre,
- La fin de vie des composants du groupe motopropulseur,
- Les impacts liés à la réduction d'autonomie (détours, changements d'usage, ...),
- Les impacts liés à la perte de volume de marchandises transportées,
- Les infrastructures supplémentaires spécifiques,
- Les éventuelles fuites de méthane (en exploitation et maintenance).

2.3.2. Le périmètre de l'évaluation environnementale

Pour une évaluation complète des impacts environnementaux, il est recommandé de réaliser une ACV des équipements et des vecteurs énergétiques « du puits à l'hélice » (c'est-à-dire de l'extraction des matières premières à l'utilisation des équipements et du vecteur énergétique, en passant par les étapes de production, assemblage et distribution, et incluant la maintenance). Ainsi, la phase d'utilisation des bateaux doit inclure non seulement le temps de navigation (impacts de la propulsion et de la consommation énergétique pour les besoins à bord), mais aussi le temps passé à quai (utilisation de groupes électrogènes externes ou des bornes électriques pour les besoins à quai).

Néanmoins, dans le cas de cette étude, les éléments du bateau n'évoluant pas lors d'une remotorisation (la coque du bateau ou la timonerie), ils ont été exclus du périmètre.

Par ailleurs, les infrastructures de charge spécifiques au gaz n'ont pas été considérées.

Ainsi, les composantes considérées dans le périmètre sont :



Figure 5 : synthèse des composantes considérées et non considérées dans les études regardées

2.3.3. Les indicateurs environnementaux considérés

Dans notre étude, nous considérons deux indicateurs environnementaux :

	Indicateur GES <ul style="list-style-type: none">• Exprimé en kg équivalent CO₂ (kg CO₂ eq).• Tient compte du pouvoir de réchauffement global des différents GES, via leur forçage radiatif
	Indicateur de particules fines <ul style="list-style-type: none">• Exprime la quantité de particules fines émises ou de leurs précurseurs, impactant la santé humaine. Tient également compte du taux d'inhalation moyen des particules. Contient :<ul style="list-style-type: none">• Particules fines : PM• Monoxyde de carbone : CO• Hydrocarbures : HC• Oxyde d'azote : NO_x

Dans l'étude FLUENT[6], un troisième indicateur présente des impacts sur les écosystèmes aquatiques via l'écotoxicité des substances. Cependant, les informations présentées dans les différentes études ne nous permettent pas de tirer des conclusions sur le bioGNC au regard de cet impact. Néanmoins au regard des propriétés du méthane (densité plus faible que l'air, provoquant une élévation du gaz en cas de fuite), sa toxicité envers les milieux aquatiques ne semble pas un point fort d'attention.

Les indicateurs environnementaux peuvent également évoluer en fonction :

- Du périmètre considéré,
- Du type de bateau,
- Du groupe propulseur,
- Des kilomètres parcourus,
- De l'usage,
- Des habitudes de conduites.

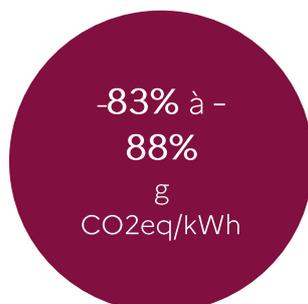
Les fuites de méthane ne sont pas prises en compte.

2.3.4. Les résultats de l'impact environnemental relatif du bioGNC

2.3.4.1. Le bioGNC par rapport au GNR

Indicateur GES

De manière générale, les écarts relatifs des émissions de GES par rapport au gazole non routier, indiquent :



Ces résultats varient dans les études, principalement au regard :

- Du périmètre considéré,
- Du type de bateau,
- Du groupe motopropulseur choisi.

Il est important de noter que la contribution aux émissions de gaz à effet de serre (GES) diffère entre les motorisations diesel et bioGNC :

- Les moteurs diesel émettent principalement du CO₂.
- Les motorisations bioGNC émettent du méthane imbrûlé. Les niveaux d'émission varient en fonction du type de moteur. Bien que les émissions de GES soient réduites et partiellement compensées par l'absorption de la biomasse, les émissions d'hydrocarbures imbrûlés, avec un pouvoir de réchauffement global (PRG)⁶ de 30, doivent être prises en compte.

Les différentes analyses menées à partir de la bibliographie, en comparaison avec des solutions fossiles, montrent que :

- **Le bioGNC est environnementalement intéressant, notamment du fait de ses émissions dites biogéniques car il y a absorption de CO₂ pendant la croissance de la biomasse.**
- Les émissions de particules fines proviennent principalement de la phase de combustion.
- L'impact du stockage sous haute pression est généralement faible, en raison des matériaux utilisés (généralement l'acier). Cependant, certains stockages de type IV notamment, utilisent des bi-composants (plastique avec revêtement composite) et ont donc un impact plus important. Elle est également liée à la consommation énergétique pour la compression.
- Il existe un manque de connaissances sur les fuites de méthanes. Ce sujet est actuellement en cours de documentation par l'ADEME.

Indicateur de particules fines

De manière générale, les écarts relatifs des émissions de particules fines par rapport au gazole non routier, indiquent :



Ces valeurs proviennent exclusivement des études technico-économiques considérant uniquement la composante « groupe motopropulseur », en se basant sur les pollutions spécifiques établies par la norme EMNR.[7], [10], [11], [12], [14], [16], [17], [18], [19]. Étant des valeurs limites d'émissions, ces valeurs peuvent être surestimées.

Les études en cours (l'ACV par GRDF sur le GNV ou encore l'ACV par l'AFBE) permettront de préciser ces valeurs d'émissions relatives.

Autres indicateurs

Concernant l'impact sur l'écotoxicité aquatique, la solution bioGNC, quelle que soit l'architecture moteur, présente des valeurs estimées légèrement inférieures à 0.05 CTUe/t.km, avec une écotoxicité principalement issue des phases de fabrication du réservoir et WTT (croissance de la biomasse)[6]. La phase TTW (navigation) ne génère aucun impact écotoxique pour les milieux aquatiques : aucune substance écotoxique n'est émise dans l'eau. En effet, les émissions de CO et d'hydrocarbures imbrûlés à la combustion des

⁶ PRG : Pouvoir de Réchauffement Climatique. Unité de mesure utilisée pour simplifier, comparer et interpréter l'influence des gaz à effet de serre (GES) sur le réchauffement climatique

carburants peuvent avoir un effet écotoxique, mais ce dernier semble insignifiant au vu des quantités émises et des fractions qui se retrouvent dans l'eau.

2.3.4.2. Le bioGNC par rapport aux autres carburants

L'impact environnemental est un critère de plus en plus déterminant dans le choix d'un mode de transport. Le transport fluvial ou maritime côtier joue un rôle clé dans la transition vers des alternatives plus écologiques.

Selon l'étude FLUENT[6], les impacts du type de propulsion (conventionnelle, hybride série ou hybride parallèle) sur les émissions de CO₂ ne varient pas drastiquement pour un même vecteur énergétique.

Toujours dans la même étude, pour les vecteurs fossiles comme le GNR, GtL ou le GNC les émissions de combustion sont la principale source d'émissions de GES. **La production et la maintenance du groupe moteur**, y compris pour les architectures hybrides, ont un impact négligeable sur les émissions de GES. Cela contraste avec les véhicules électriques routiers où le cycle de vie de la batterie Li-ion a un impact significatif sur les émissions.

La synthèse ci-dessous résume l'état des connaissances sur l'usage des carburants alternatifs dans le transport fluvial[7], à partir des différentes sources de carburants. Ces carburants sont rangés par ordre croissant de degré d'innovation, impliquant un délai d'adoption allant du court terme (les carburants nécessitant peu de modification et d'investissement) au long terme. Une analyse critique a également été établie en fonction du caractère renouvelable de la production, de son adaptabilité sur la flotte actuelle et l'investissement nécessaire à son déploiement (coût de la solution et effort en recherche et développement).

La classification suivante est utilisée :

- | | | |
|----------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| ● Production renouvelable | Adaptabilité facile | Investissement nécessaire faible |
| ● Production peu renouvelable | Adaptabilité moyenne | Investissement nécessaire moyen |
| ● Production de sources fossiles | Adaptabilité difficile | Investissement nécessaire important |

Tableau 4 : Synthèse des avantages et inconvénients de différents carburants alternatifs (ADEME[7])

Type d'intégration	Carburant	Production	Adaptabilité	Investissement	Effet moyen sur les émissions		
					NOx (g/kWh)	PM (g/kWh)	CO2éq. (g/kWh)
Sans modification	BTL*	●*	●	●	-13%	-20%	-80%
	GTL	●	●	●			-4%
	HVO**	●	●	●			-90%
Modification architecture motrice nécessaire	GNL	●	●	●	-50% à - 75%	-50% à - 90%	+4%
	bioGNL	●	●	●			-75%
	GNC	●	●	●			+4%
	bioGNC	●	●	●			-80 à 88%
	H2 ICE	●	●	●	0%	-90%	-10%
	H2 ICE (d'origine EnR&R)	●	●	●			-80%
	Méthanol ICE	●	●	●	-70%	-99%	-17%
	Méthanol ICE (d'origine EnR&R)	●	●	●			-80%

*Le BTL est produit à partir de biomasse dont la source peut entrer en concurrence avec d'autres usages.

**Le HVO fabriqué à partir d'huiles et de graisses usagées peut-être difficile à tracer, risque d'entraîner un transfert des utilisateurs qui consomment actuellement des graisses usagées vers des huiles neuves et dispose d'une ressource très limitée. Le HVO est aussi un carburant convoité par l'aviation, ce qui peut créer un problème de concurrence d'usage.

Des études complémentaires sont nécessaires pour confirmer les résultats du tableau ci-dessus. Bien qu'il soit difficilement envisageable de proposer une trop grande diversité de carburants alternatifs, pour des raisons évidentes de contraintes financières et opérationnelles (réseau de stations d'avitaillement notamment), il est indispensable d'aborder la transition énergétique des transports sous un angle multi-carburants.

2.4. Le contexte réglementaire

A retenir :

- Dans la navigation maritime, la réglementation autorise le GNC, suivant les mêmes dispositions que le GNL. Cependant, les prescriptions diffèrent en ce qui concerne le stockage du combustible, en raison de contraintes moindres, notamment sur l'aspect cryogénique.
- Dans la navigation fluviale, le règlement EMNR et les prescriptions de l'ES-TRIN de la CCNR sont en vigueur. La réglementation actuelle n'autorise pas les carburants avec un point éclair inférieur à 55°C, excluant ainsi le GNC. Des révisions futures de l'ES-TRIN pourraient inclure des statuts pour le GNC.
- En ce qui concerne l'avitaillement, la réglementation est claire pour les installations fixes (ICPE) mais un flou subsiste concernant la catégorisation de l'avitaillement mobile (ADR / ADN ou parfois ICPE).
- Les contraintes réglementaires ont été citées par tous les acteurs comme étant un des principaux freins au développement du GNC.
- Les armateurs, bureaux d'études et motoristes évoquent le besoin d'un cadre réglementaire et d'orientations nationales plus ouverts à la diversité des solutions de motorisations alternatives pour qu'elles puissent se développer.
- Du côté des administrations françaises et européennes (DGAMPA, DGITM, CESNI), il est important de construire le cadre réglementaire à partir de retours d'expérience de projets et démonstrateurs, afin de mettre en place des prescriptions et recommandations adaptées et durables.

2.4.1. La navigation maritime

Carburants et émissions

L'Organisation Maritime Internationale (OMI) est responsable de la régulation des émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur maritime. Un accord international a été promulgué par l'OMI le 7 juillet 2023 pour décarboner le secteur du fret maritime, visant des émissions nettes nulles d'ici 2050, en tenant compte des particularités nationales variées.

En France, l'organisme chargé de la retranscription des réglementations de l'OMI est la **direction générale des affaires maritimes, de la pêche et de l'aquaculture (DGAMPA)**.

Le règlement (UE) 2023/857, adopté le 19 avril 2023, fixe des réductions annuelles obligatoires des GES pour les États membres de l'UE, dans le but de réduire les émissions de 40 % par rapport aux niveaux de 2005 d'ici 2030.

Le Règlement UE 2023/1805, adopté le 13 septembre 2023, connu sous le nom de 'FuelEU Maritime', encourage l'utilisation de carburants renouvelables et bas carbone dans le transport maritime. Il s'applique aux navires de plus de 5 000 tonnes de jauge brute, pour le transport de passagers ou de marchandises, et est entré en vigueur le 12 octobre 2023. Les dispositions clés incluent :

- Réduction progressive de l'intensité des émissions de GES des carburants maritimes, de 2 % en 2025 à 80 % d'ici 2050.
- Incitation à l'utilisation de carburants renouvelables non biologiques.
- Exclusion des combustibles fossiles du processus de certification.
- Réduction de la pollution atmosphérique dans les ports.

Ce Règlement favorise les biocarburants avancés (fabriqués à partir de résidus et de déchets), ainsi que les carburants de synthèse à base d'hydrogène. Il exclut cependant des biocarburants à base de cultures destinées à l'alimentation humaine ou animale.

Réglementation spécifique au GNC

Les dispositions obligatoires d'organisation, d'installation, de contrôle et de surveillance des équipements et systèmes dans les navires fonctionnant au GNC sont indiquées dans le Recueil IGF (Recueil international de règles de sécurité applicables aux navires qui utilisent des gaz ou d'autres combustibles à faible point d'éclair).

Le GNC ayant un point d'éclair identique au GNL (-188°C) et en l'absence de réglementation dédiée, les dispositions qui s'y appliquent sont actuellement les mêmes que pour le GNL. Cependant, les prescriptions diffèrent en ce qui concerne le stockage du combustible, en raison de contraintes moindres, notamment sur l'aspect cryogénique.

Globalement, le code IGF préconise une évaluation des risques résultant de l'utilisation des combustibles à bas point éclair (personnes à bord, environnement, structure du navire, intégrité du navire). La conception doit tenir compte de ces risques et de toutes les défaillances possibles, ainsi que des besoins spécifiques pour l'exploitation et la maintenance.

L'évaluation des risques doit être effectuée conformément à la recommandation de l'IACS n°146 « Évaluation des risques telle que requise par le code IGF »⁷ :

- Une étude HAZID doit être réalisée couvrant au moins le réservoir, l'espace de raccordement au réservoir (TCS) et la structure adjacente.
- Une analyse AMDEC est à réaliser pour les équipements très haute pression.
- Une étude HAZOP est à réaliser pour les installations de gaz combustible à très haute pression.
- Les équipements homologués n'ont pas besoins d'être pris en compte dans l'étude.
- Une analyse d'explosion est requise pour les locaux de machines protégés contre les décharges électrostatiques. Cette analyse peut également être requise pour d'autres espaces dangereux, à la suite de l'évaluation des risques. Les analyses d'explosion doivent démontrer que, dans le pire des cas, la pression maximale accumulée en cas d'explosion ne dépasse pas la pression de conception de l'espace, en tenant compte de la disposition de ventilation et des dispositifs de décompression d'explosion, le cas échéant.

Le recueil IGF a été intégré par l'OMI dans la convention SOLAS pour les navires d'une jauge brute supérieure à 500. En France, la DGAMPA l'a transposé dans la réglementation nationale (via le décret n°84-810 du 30 août 1984). Cette réglementation a été déclinée dans les différentes divisions et arrêtés, couvrant ainsi les navires de jauge supérieure et inférieure à 500, qu'il s'agisse de navires de passagers, de pêche, de fret ou encore de chalands. Il n'y a donc pas de verrou réglementaire pour ceux-ci.

Bien qu'il n'y ait pas encore de réglementation spécifique au bioGNC dans le maritime, un projet de navire type à soumettre à la Commission Régionale de Sécurité est en cours et sera soumis à une analyse de risque.

2.4.2. La navigation fluviale

2.4.2.1. Cadre Européen

Sur les voies de navigation intérieure de l'UE ou sur le Rhin, une réglementation et des prescriptions techniques coexistent :

- **Règlement EMNR** de l'Union Européenne : Règlement (UE) 2016/1628 concernant les émissions d'engins mobiles non routiers (EMNR) de la phase V,
- **Prescriptions techniques** de la Commission Centrale pour la Navigation du Rhin (CCNR) : Formulées et gérées par le CESNI, à travers l'ES-TRIN, sur lequel se base notamment la Directive UE 2016/1629,

⁷ Données issues du document « Fiche n°3 Rapport réglementaire sur le GNC »

En France, l'organisme régulateur chargé de retranscrire les règlements et directive est la **Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités (DGITM)**.

Réglementation EMNR

Le Règlement EMNR (UE 2016/1628), en vigueur depuis janvier 2017, fixe des normes pour les émissions polluantes des moteurs d'engins mobiles non routiers (EMNR) dans l'UE. Les fabricants de moteurs doivent obtenir une certification pour chaque type et catégorie de moteurs destinés au marché européen. Cette démarche assure la conformité des moteurs avec les limites d'émissions établies par le règlement.

La réglementation EMNR reconnaît quatre catégories de moteurs homologués stage V :

- **Sans dérogation :**
- **Catégorie IWP :** Moteurs pour la propulsion de bateaux (≥ 19 kW).
- **Catégorie IWA :** Moteurs auxiliaires (≥ 19 kW).
- **Avec dérogation :**
- **Catégorie NRE :** Moteurs pour engins mobiles non routiers (< 560 kW), avec des prescriptions techniques supplémentaires pour la marinisation.
- **Euro VI :** Moteurs pour poids lourds, également soumis à des conditions supplémentaires de marinisation.

De nouvelles limites sont imposées aux propriétaires de bateaux concernant les performances du moteur, lorsque celui-ci est installé après la date d'entrée en vigueur du règlement (2019-2020). Ainsi, dans le cadre de la réglementation au stade V, les émissions du moteur doivent être considérablement restreintes. Les limites du stade V, conformément au tableau ci-dessous, sont applicables aux moteurs de propulsion (IWP) et auxiliaires (IWA) de plus de 19 kW, indépendamment du type d'allumage du moteur.

Tableau 5 : Nomes d'émissions de niveau V pour les moteurs de bateaux de navigation intérieure (IWP et IWA)

Catégorie IWP/IWA-v	Puissance nette kW	CO g/kWh	HC g/kWh	NOx g/kWh	PM g/kWh	PN 1/kWh	A*
C-1	19 - 75	5	4.7				6
C-2	75 - 130	5	5.4				6
C-3	130 - 300	3.5	1	2.1	0.1		6
C-4	> 300	3.5	0.19	1.8	0.015	1x10 ¹²	6

Tableau 6 : Nomes d'émissions de niveau V pour les moteurs de bateaux de navigation intérieure (NRE)

Catégorie NRE-v	Puissance nette kW	CO g/kWh	HC g/kWh	NOx g/kWh	PM g/kWh	PN 1/kWh	A*
C-3	19 - 37	5	4.7		0.015	1x10 ¹²	1.1
C-4	37 - 56	5	4.7		0.015	1x10 ¹²	1.1
C-5	56 - 130	3.5	0.19	0.4	0.015	1x10 ¹²	1.1
C-6	130 - 560	3.5	0.19	0.4	0.015	1x10 ¹²	1.1

*A : coefficient pour le calcul de la limite d'émissions en hydrocarbures spécifique aux moteurs fonctionnant partiellement ou totalement au gaz.

Prescriptions techniques

Depuis 2015, le CESNI (comité européen pour l'élaboration de standards dans le domaine de la navigation intérieure) actualise le Standard européen pour les bateaux de navigation intérieure (ES-TRIN) pour garantir leur sécurité. Ce standard établit des normes uniformes pour la construction, l'aménagement, et l'équipement des bateaux. Il inclut des dispositions spécifiques pour différentes catégories de bateaux. Les éditions suivantes ont pris en compte les développements techniques et les retours d'expérience. L'ES-TRIN est désormais intégré au cadre juridique de l'UE et de la CCNR. La Commission du Danube le recommande, et d'ici 2023, tous les États riverains du Danube devraient l'avoir mis en œuvre. La Commission internationale du bassin de la Save envisage également de l'inclure dans son cadre juridique. En résumé, **l'ES-TRIN est devenu la référence pour les exigences techniques des bateaux de navigation intérieure en Europe, renforçant la gouvernance et l'harmonisation à l'échelle européenne.**

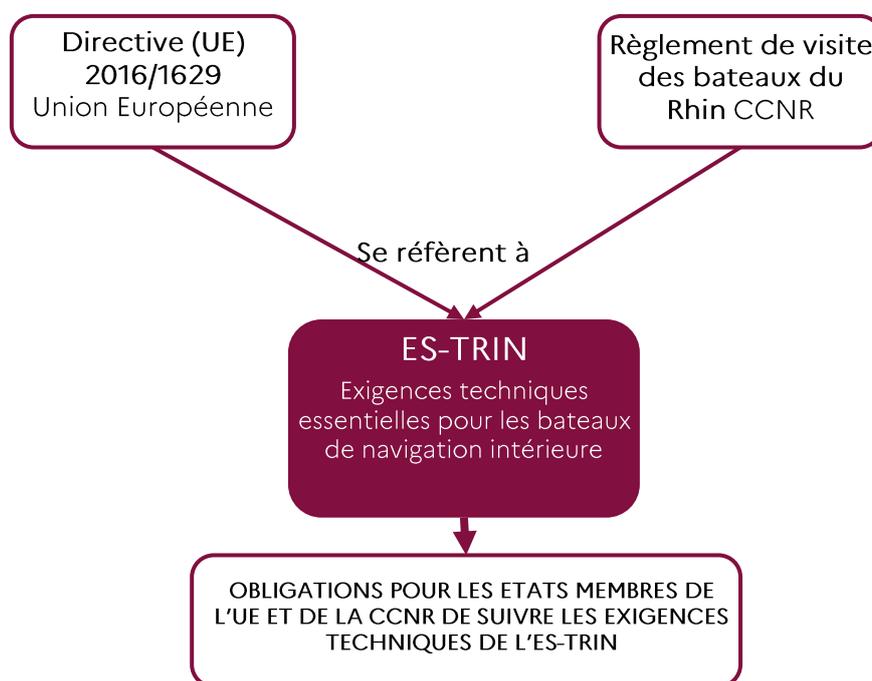


Figure 6 : Articulation entre la directive EU et l'ES-TRIN

L'ES-TRIN est révisé tous les 2 ans, à la suite de groupe de travail multi-acteurs dont la France fait partie. Nous suivons actuellement l'ES-TRIN 2023.

La réglementation ES-TRIN 2023 n'autorise pas les carburants ayant un point éclair inférieur à 55°C et donc par extension, le GNC.

Dans la prochaine révision de l'ES-TRIN (publié en 2025, appliqué en 2026), **le stockage et l'utilisation du GNC doivent être statués.** Dans l'attente de ces modifications, la mise en place d'une propulsion uniquement au bioGNC ou en hybridation avec une propulsion électrique, doit faire l'objet d'une dérogation auprès du CESNI.

A date, aucune proposition d'organisation de la part de la France n'a été soumise.

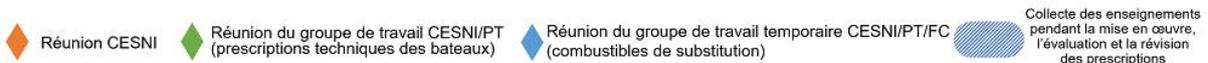
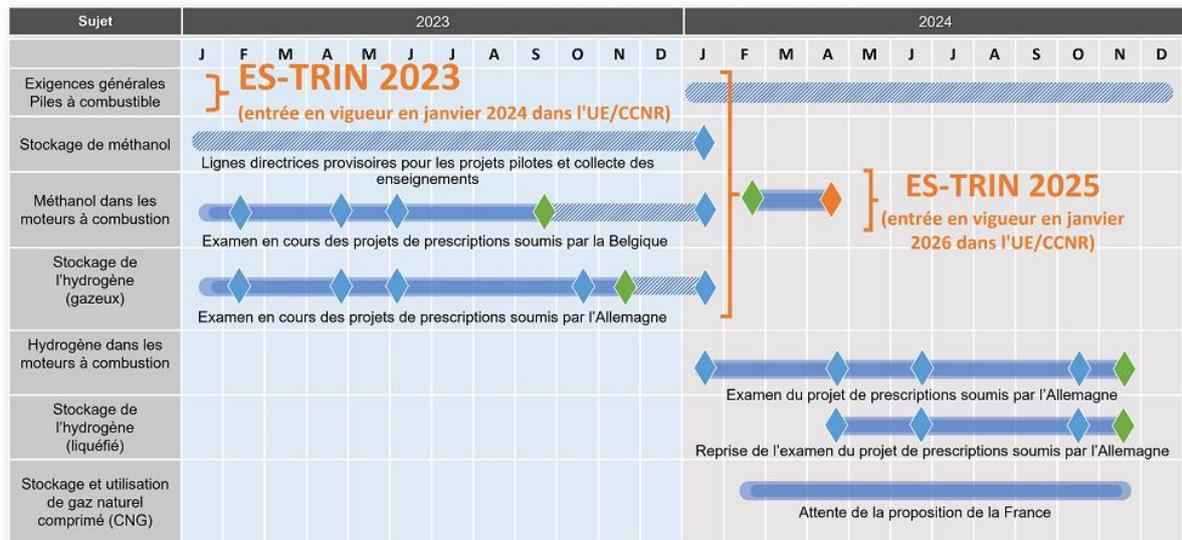


Figure 7 : Calendrier provisoire pour les travaux réglementaires (CESNI – mars 2023)

2.4.2.2. Demande de dérogation du bioGNC

Bien qu'aucune prescription technique n'existe pour l'instant concernant le bioGNC, il en existe cependant une pour l'utilisation du GNL⁸ (décrites à l'Annexe 8 de l'ES-TRIN 2023), sur laquelle les dérogations peuvent s'appuyer.

Elle décrit les éléments de sécurité à considérer dans :

- Le système de confinement,
- Les systèmes de tuyauteries,
- Les systèmes d'assèchement,
- Les gattes,
- L'agencement des entrées et autres ouvertures,
- Les systèmes de ventilations,
- Le système d'avitaillement,
- Les limites de remplissages des réservoirs,
- Le système d'alimentation et l'arrêt,
- La sécurité incendie,
- Les systèmes de commande et de surveillance.

La démarche relative à la demande de dérogation

Les bateaux ne répondant pas aux prescriptions techniques doivent formuler une demande de dérogation et fournir un dossier technico-économique détaillant l'ensemble du bateau.

Le cadre relatif aux demandes de dérogations et équivalences aux prescriptions techniques de l'ES-TRIN est décrit par le CESNI⁹ et repris dans la directive (UE) 2016/1629.

⁸ L'ES-TRIN 2023 - Annexe 8 « Dispositions supplémentaires pour les bâtiments utilisant des combustibles dont le point d'éclair est inférieur ou égal à 55 °C »

⁹ Guide sur les délibérations relatives aux dérogations et équivalences aux prescriptions techniques de l'es-trin pour des bâtiments spécifiques

Etapas	Type de certificat	
	Certificat de visite des bateaux du Rhin	Certificat de l'Union pour bateaux de navigation intérieur
Préparation du dossier	Initiateurs du projet et autorité nationale (3-12 mois)	
Soumission de la demande	Au Groupe de travail RV/G par l'intermédiaire du Secrétariat de la CCNR (max. 3 mois, en temps utile avant une réunion)	Au Groupe de travail CESNI/PT par l'intermédiaire du Secrétariat de la CCNR (max. 3 mois, en temps utile avant une réunion)
Examen technique	Groupe de travail RV/G (6-9 mois)	Groupe de travail CESNI/PT (6-9 mois)
Procédure d'approbation	CCNR (publication) (2 semaines)	Communication de l'Etat membre à la CE - adoption de l'acte d'exécution ³ (environ 12 mois)

Les prescriptions demandées pour les moteurs à méthane, les salles machines de moteurs à méthane et toute la partie distribution (vannes, tuyauteries, ...) jusqu'en amont du vaporisateur d'un système GNL est applicable à la remotorisation GNC car ces parties sont strictement identiques (méthane sous forme gazeuse, comprimé à environ 10 bars et à température ambiante). Les éléments nouveaux constitutif du dossier technico-économique sont :

- Le détendeur (qui remplace le vaporisateur),
- La tuyauterie et les équipements haute pression (qui remplacent la tuyauterie et les équipements GNL appropriés à l'état cryogénique du méthane),
- Le réservoir bioGNC (qui remplace le réservoir GNL).

L'exemple de Green Deliriver

Dans le cadre du projet GreenDeliriver, une demande a été faite auprès de la CCNR en 2022. Une fois la dérogation obtenue, le document autorisant le bateau à déroger à l'ES TRIN a été transmis à la Direction Régionale Interdépartementale de l'Environnement, de l'Aménagement et des Transports du territoire et à la Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de Mobilités. Ils s'appuient ensuite sur l'avis d'organisme de certification. **Le permis de navigation du projet a été obtenu en mars 2023.** Il s'agit aujourd'hui du seul cas existant de dérogation pour une navigation au GNC en France.

Il apparaît donc primordial de prendre également contact avec la direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités (DGITM) concernant les aspects réglementaires.

Les porteurs du projet se sont appuyés sur la réglementation GNL de l'ES-TRIN en analysant les points applicables au GNC et les points non applicables. La demande de dérogation a porté sur ces derniers, en amenant une justification pour chacun d'eux.

Il est également à noter que l'arrêté du 20 août 2019, relatif à la délivrance de titres de navigation sur une zone de navigation restreinte, permet de déroger aux règles Européennes, notamment dans le cas des bateaux innovants. À noter que la zone de navigation est, au plus, restreinte au territoire national. La procédure est similaire à une demande de titre classique, incluant la fourniture de pièces supplémentaires (étude de risque ...), et la constitution par l'autorité compétente d'un comité technique consultatif.

2.4.3. Le stockage bioGNC

Les réglementations concernant le stockage terrestre du bioGNC, dans des réservoirs sous pression à température ambiante, sont régies à la fois par des normes européennes et nationales.

Au niveau européen, l'Annexe I de la Directive 2012/18/UE définit les seuils SEVESO pour le gaz naturel, avec un seuil bas à 10 tonnes et un seuil haut à 50 tonnes.

Au niveau national, le stockage de bioGNC est classé sous la rubrique ICPE 4310. Cela s'applique que le stockage soit effectué dans des modules ou des réservoirs, ou que le gaz soit contenu dans des équipements de process. Cette classification exige soit une déclaration, soit une autorisation, selon les quantités stockées et les installations concernées.

Gaz inflammables catégorie 1 et 2.

La quantité totale susceptible d'être présente dans les installations y compris dans les cavités souterraines (strates naturelles, aquifères, cavités salines et mines désaffectées) étant :	
1. Supérieure ou égale à 10 t	(A-2)
2. Supérieure ou égale à 1 t et inférieure à 10 t	(DC)

Tableau 7 : Rubrique ICPE 4310

Dans le cas d'un stockage associé à une station d'avitaillement, la rubrique ICPE 1413 s'applique :

1. Le débit total en sortie du système de compression étant :	
a) Supérieur ou égal à 2 000 m ³ /h	(A - 1)
b) Supérieur ou égal à 80 m ³ /h, mais inférieur à 2 000 m ³ /h	(DC)
2. La masse totale de gaz contenu dans l'installation étant :	
a) Supérieure à 10 t lorsque l'installation n'est pas classée au titre du 1.a	(A)
b) Supérieure à 1 t, mais inférieure ou égale à 10 t lorsque l'installation n'est pas classée au titre du 1	(DC)
Nota. - Les débits sont exprimés pour une température de gaz de 273,15 K à une pression de 101,325 kPa.	

Tableau 8 : Rubrique ICPE 1413

Dans le cas de la déclaration, c'est l'arrêté du 07/01/03 qui s'applique.

Dans le cas où le régime de l'autorisation de la rubrique n°1413 s'applique, il n'existe pas d'arrêté défini. Les exigences seront donc prescrites dans un arrêté préfectoral d'autorisation environnementale, octroyé au site à l'issue de l'instruction d'un dossier de demande d'autorisation environnementale comportant notamment une étude de dangers et une étude d'impact/étude d'incidence.

2.4.4. L'avitaillement

2.4.4.1. Exigences particulières

L'arrêté du 07 janvier 2003 précise, pour les installations de compression et de stockage de gaz naturel et de biogaz, les distances à respecter :

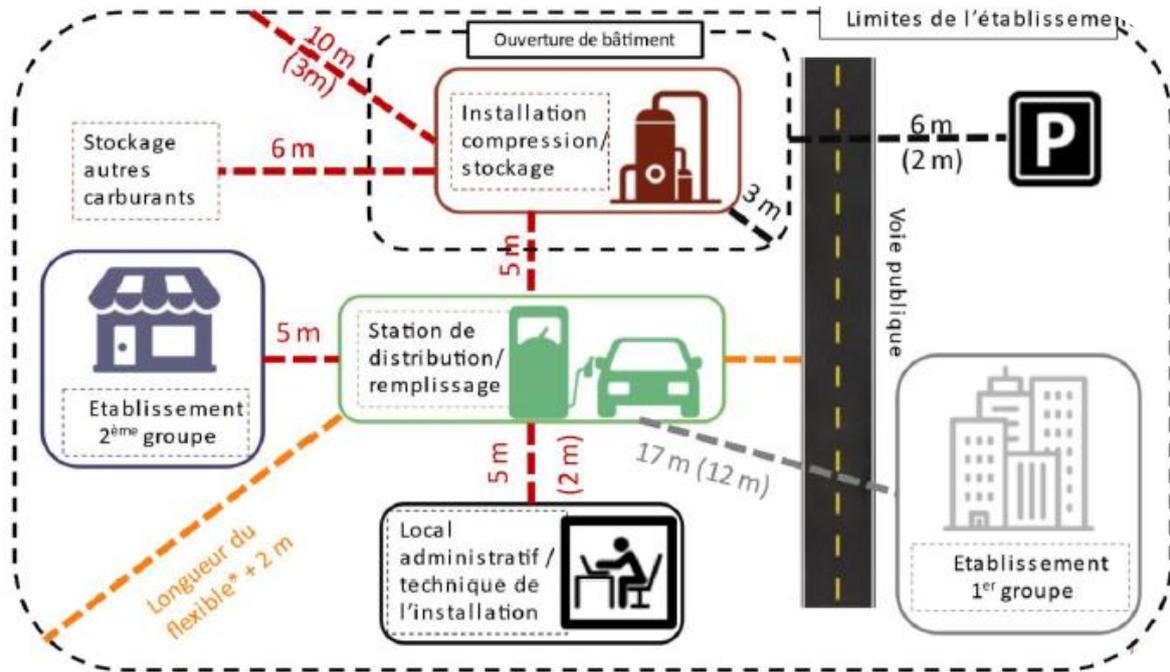


Figure 8 : Schéma des distances à respecter pour les installations de compression et stockage de gaz naturel (source : S3D)

2.4.4.2. Réglementation spécifique aux stations d'avitaillement (bateau-bateau et camion-bateau)

En fonction de la nature de la station d'avitaillement, différentes réglementations s'appliquent :

Réglementation du Camion Avitailleur

Jusqu'à son arrivée au port, le camion avitailleur est régi par l'ADR (Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route). Lors du stationnement au port, c'est le règlement local du port qui s'applique.

Procédures d'Avitaillement au Port

Pour avitailler au port, une demande d'autorisation doit être faite auprès de l'autorité portuaire. Cette demande peut être approuvée directement par le port ou soumise à la préfecture responsable du règlement portuaire. Les quantités de matières dangereuses autorisées sont définies dans le règlement portuaire.

Avitaillement direct bateau-bateau ou navire-navire

L'avitaillement direct de bateau à bateau est interdit pour les carburants classés comme marchandises dangereuses, à l'exception du diesel et du GNL. Ces exceptions sont régies par le RPM (Règlement pour le transport et la manutention des marchandises dangereuses dans les Ports Maritimes).

Avitaillement Camion-Bateau

Il n'existe pas de réglementation spécifique pour l'avitaillement direct du camion au bateau. La réglementation ADR s'applique jusqu'au point de stationnement du camion, puis il convient d'appliquer la réglementation du port pour l'opération d'avitaillement (RPM : règlement pour le transport et la manutention des marchandises dangereuses dans les ports). L'application ou non des prescriptions de l'arrêté ICPE 1413 (correspondant aux stations d'avitaillement GNC) à l'opération de remplissage (configuration des équipements, distances de sécurité...) est à statuer par les autorités portuaires et la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques).

2.5. La faisabilité technique

A retenir :

- Le choix des architectures motrices dans les projets étudiés converge vers une propulsion 100% GNC ou une hybridation en série GNC – électrique.
- Il n'existe qu'un seul moteur gaz actuellement homologué et marinisé : MAN 2862 495 kW (GE), seulement disponible en version groupe électrogène.
- Le manque de disponibilité des moteurs gaz adaptés aux unités fluvio-maritimes est un frein fort au développement de la filière.
- L'utilisation de bioGNC entraîne une perte d'autonomie (de l'ordre de 3 à 5 fois moins) à volume égale, par rapport au GNR. Cette perte d'autonomie peut être compensée en augmentant la capacité de stockage à bord ou en changeant l'exploitation (arrêts pour avitaillement, vitesse conduite, etc).
- Une étude technique détaillée sur la marinisation des moteurs GNV pourrait faciliter des discussions plus structurées avec les motoristes, levant ainsi certains obstacles et autorisant potentiellement la marinisation de moteurs GNV supplémentaires.
- Le stockage de GNC est finalement moins dangereux que celui de l'hydrogène (moins de pression, moins de risque de fuite et zone d'explosivité réduite).
- La question de la sécurité n'est finalement pas tant technique que didactique avec un enjeu important de sensibilisation et de mesure / protocole de sécurité et de gestion des accidents.
- L'avitaillement doit se penser dès le début du projet et n'est pas à négliger. Il faut considérer : le lieu d'avitaillement et les conditions techniques.
- Une station mutualisée avec d'autres acteurs du territoire (routier, ferroviaire ou industrie) est essentielle pour diminuer les coûts et créer des synergies. Le foncier stratégique pour accueillir ces stations mutualisées doit être identifié.

2.5.1. Les différentes architectures propulsives

On définit l'architecture propulsive comme étant le choix des équipements et le montage technique du réservoir aux propulseurs.

Dual fuel gaz / diesel

Le moteur Diesel dual-fuel dispose d'une injection supplémentaire spécifique pour le gaz naturel. Le Fuel/Gazole (FOD, GNR) combiné au bioGNC assure l'auto-inflammation du mélange.

La proportion de gaz est maximale en régime continu en vitesse de croisière (jusqu'à environ 80% à 90%) et minimale au ralenti, en manœuvre et au démarrage (de 50% à 0%). Ce type de moteur peut également fonctionner uniquement au gazole.¹⁰

¹⁰ Données issues du document « Cahier technique N°3 – Propulsion gaz pour bateaux fluviaux »

Projet ayant étudié/choisi cette propulsion

- **Fish2EcoEnergy, remotorisation.** Un moteur dual fuel gaz / diesel a été installé. Cependant, seule la propulsion fioul est utilisée actuellement.

Cette architecture motrice n'est aujourd'hui plus envisagée dans les projets.

100% GNC

Le moteur gaz naturel dispose d'un circuit d'allumage commandé, similaire à celui d'un moteur essence, mais fonctionnant uniquement avec du gaz naturel (ou assimilé : biométhane). Il est relativement simple à produire, d'un point de vue technique pour un motoriste, en partant d'une base technique de moteur diesel. D'un point de vue réglementaire, son intégration est plus difficile.

A partir d'une base diesel, il faut apporter les modifications suivantes [20]:

- Mise en place de bougie d'allumage dans la chambre de combustion, généralement à la place de l'injecteur, et des bobines d'allumage,
- Changement ou modification du répartiteur d'admission pour placer les injecteurs (ou carburateur) et du boîtier papillon qui va réguler la charge,
- Modification du piston au niveau de sa face supérieure pour augmenter la turbulence et pour réduire le taux de compression (par rapport à un Diesel),
- Changement de tout le circuit carburant : pompe, mise en place d'un détendeur et filtre à huile sur le circuit gaz.

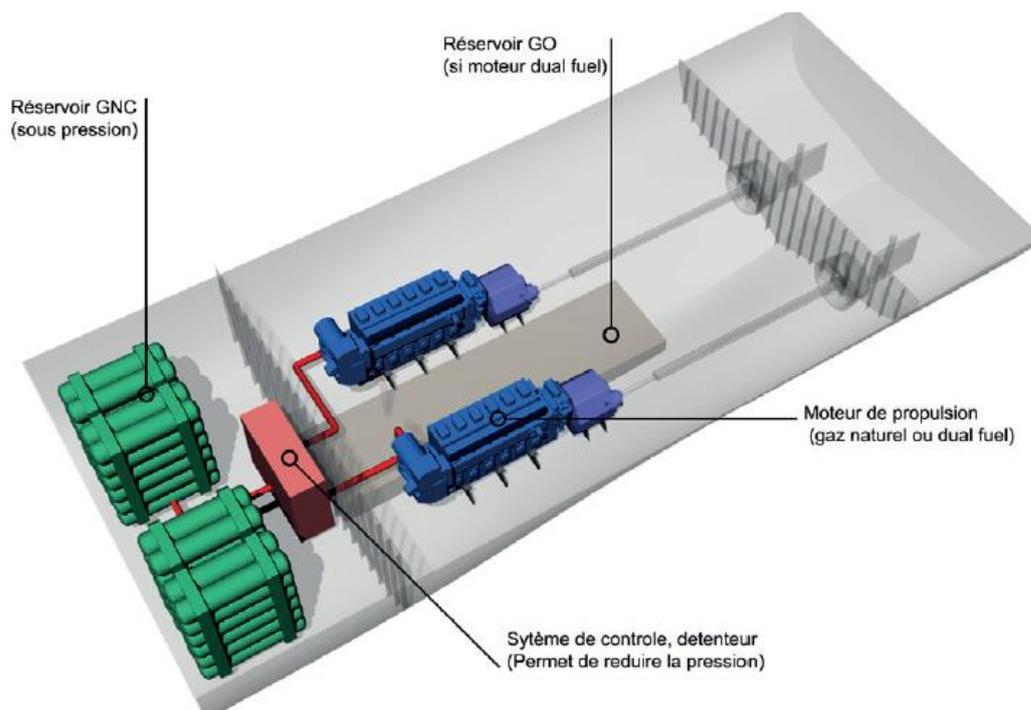


Figure 9 : Représentation graphique de l'architecture propulsive 100% GNC (Batelia, Lebéfaude Solutions Navales)¹¹

Projets ayant étudié/choisi cette propulsion

- **Pousseur Béliér, remotorisation.** L'étude conclue que seule la solution avec moteur gaz d'entraînement direct des lignes propulsives serait envisageable, sous réserve que le moteur soit homologué et commercialisé dans un délai compatible avec le planning de transformation du Béliér. L'architecture hybride série avec génératrices entraînées par un moteur gaz ou dual-fuel ne semble pas envisageable à court terme, car complexifie le

¹¹ Représentation à 2 moteurs. Des architectures de 1, 2 ou 3 moteurs sont possibles.

schéma énergétique et entraîne une perte de rendement de l'ordre de 10%, sans retravail de la chaîne de conversion.

- **Bacs fluviaux, remotorisation.** Permet de conserver l'architecture actuelle de propulsion directe, facilitant la transformation.

Hybridation en série GNC - électrique

Dans cette architecture, le moteur GNC est transformé et utilisé en tant que générateur électrique et est disposé en série d'un parc de batterie, pouvant être à son tour alimenté par une source de production d'électricité (de panneaux PV par exemple). Cette architecture inclut un moteur thermique et 2 machines électriques. Un premier ensemble composé du moteur thermique et d'une génératrice (GEN) dont l'ensemble est similaire à un groupe électrogène. Celui-ci fournit l'énergie au moteur électrique (MOT) et/ou de recharger la batterie.

Cette architecture a l'avantage de permettre le découplage du moteur thermique aux appels de puissance de l'hélice et ainsi de fonctionner sur les points de meilleur rendement du moteur thermique.

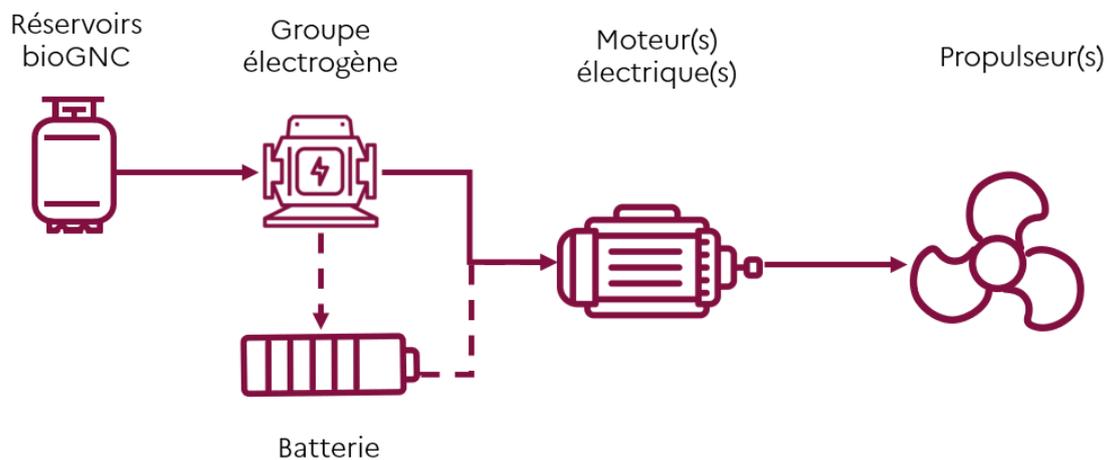


Figure 10 : Représentation de l'architecture hybride série

L'hybridation série est recommandée pour les unités neuves, car elle offre de nombreux avantages :

- Permet d'adapter les puissances aux besoins des bateaux par l'usage de plusieurs groupes électrogènes permettant aux moteurs de fonctionner sur leurs points de meilleur rendement ou d'être éteints si la demande énergétique est faible,
- Permet de changer la source énergétique de propulsion au gré des contraintes réglementaires (propulsion électrique dans les ZFE par exemple),
- Permet d'optimiser le rendement thermique et le fonctionnement du bateau, grâce au découplage du moteur thermique (en régime fixe) face aux variations d'appel de puissance de l'hélice.

Néanmoins, il est à noter que :

- Le moteur gaz, contrairement à son homologue diesel, a un rendement qui chute rapidement lorsqu'il est utilisé en dehors de la pleine charge. Aussi, sur un cycle d'exploitation, où le groupe électrogène ne serait pas exploité à pleine puissance (ou proche), de manière continue, le rendement général du GMP sera potentiellement faible.
- Cette architecture peut être pénalisée par la cascade de rendement de l'ensemble de chaîne de propulsion : moteur électrique, génératrice et moteur thermique. Il est estimé une surconsommation d'environ 10%. Contrairement aux véhicules routiers, la récupération d'énergie lors des phases de diminution de la vitesse n'est pas possible.

La prise en compte d'un réseau de bord et la gestion à la demande du démarrage de plusieurs groupes électrogènes en parallèle n'est pas possible. Cette dernière solution est potentiellement pertinente selon les applications à condition que l'optimisation énergétique de bord et le besoin énergétique soient correctement établis.

Projets ayant étudiés/choisis cette propulsion

- **Green Deliriver, remotorisation.** La chaîne énergétique complète à été repensée. Le projet équipe le bateau de génératrices gaz et d'une propulsion électrique en série, séparée par une batterie.
- **Androméda, remotorisation.** L'étude réalisée démontre la faisabilité d'une remotorisation hybride GNC - électrique de l'Androméda. La solution hybride est celle qui est retenue. Les équipements de la chaîne propulsive ont été sélectionnés et dimensionnés afin de répondre aux besoins.
- **Grand Pavois, remotorisation.** L'étude réalisée démontre la faisabilité d'une remotorisation hybride GNC - électrique du Grand Pavois. La solution hybride est celle qui est retenue. Les équipements de la chaîne propulsive ont été sélectionnés et dimensionnés afin de répondre aux besoins. Les batteries installées sont des batteries recyclées, afin de diminuer les coûts.
- **Pousseur GNC, construction neuve.** Le projet équipe le bateau de génératrices gaz et d'une propulsion électrique en série, séparée par une batterie.

Les notes techniques de ces 4 projets ont été construites par le même bureau d'étude.

Architecture hybride parallèle

Cette architecture est constituée d'une chaîne de traction thermique et d'une chaîne de traction électrique. Les deux branches sont disposées en parallèle et fournissent leur puissance à un arbre « hélice » commun.

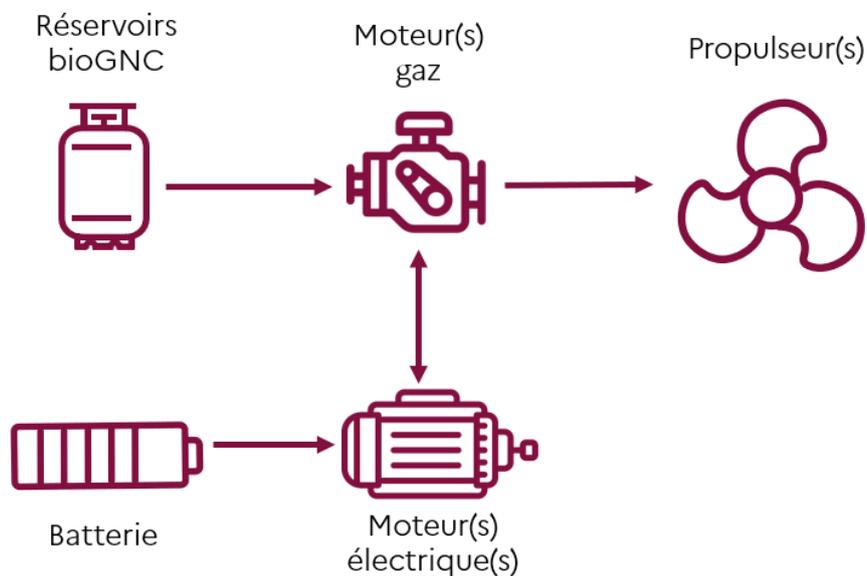


Figure 11 : Représentation de l'architecture hybride parallèle

En fonction de la navigation et des demandes de puissance, plusieurs fonctionnements sont possibles :

- Le moteur thermique fournit exclusivement la puissance, le moteur électrique est entraîné à vide,
- Le moteur thermique fournit une puissance supérieure au besoin et le surplus est dérivé vers la batterie au travers de la machine électrique,
- Les moteurs électrique et thermique fonctionnent en parallèle,
- Le moteur électrique fournit exclusivement la puissance.

Une hybridation bioGNC implique potentiellement le changement du moteur et du groupe motopropulseur. Dans ce cas, le moteur thermique est dimensionné afin d'optimiser le fonctionnement. Généralement une réduction de la puissance totale embarquée de l'ordre de 15% à 30% est possible. Le moteur électrique vient alors compléter le groupe motopropulseur afin de fournir les pointes de puissance.

L'architecture hybride parallèle permet une meilleure exploitation du moteur thermique sur des points de fonctionnement de meilleur rendement : si la puissance de propulsion est basse, c'est la chaîne électrique à haut rendement qui fonctionne, en ayant notamment recours à l'énergie stockée dans les batteries. Cela permet une augmentation du rendement globale et donc une réduction des consommations.

Cependant, cette architecture propulsive nécessite beaucoup d'espace à bord du bateau.

Projet ayant choisi/étudié cette propulsion

Aucun projet ne semble avoir étudié cette solution. L'hybridation en parallèle semble donc sans intérêt, au profit notamment de l'hybridation en série.

2.5.1.1. La remotorisation et la marinisation

Pour qu'un moteur initialement utilisé dans le transport routier soit utilisable dans la propulsion d'un bateau, il doit :

- Être adapté au milieu fluvial ou maritime : c'est la **marinisation**. La **marinisation** désigne la modification d'un moteur destiné à être installé à bord d'un bateau de navigation intérieure afin qu'il soit conforme à la directive (UE) 2016/1629. Il s'agit de modification technique du moteur, notamment sur le refroidissement de ce dernier et sur les rejets.
- Être **homologué ou certifié** : Stage V, IMO tier 3 ou EURO VI.

Selon le CESNI¹², la marinisation concerne notamment les changements techniques suivants :

- Éléments de refroidissement
- Éléments du système d'alimentation en carburant,
- Éléments de commande,
- Éléments de la fonction de surveillance,
- Composant du système de post-traitement des gaz d'échappement,
- ...

L'enjeu de la marinisation est de garder l'homologation. Après avoir effectué les changements techniques sur le moteur, le motoriste liste toutes les modifications apportées au moteur ainsi que sa stratégie de contrôle des émissions permettant la comparaison à la documentation d'origine du moteur homologué. Une fois ces changements listés, l'autorité compétente (bureau de contrôle agréé) en matière d'agrément ou un service technique examine ces modifications et définit leur statut. Voici schématiquement la procédure décrite par le CESNI[21] :

¹² Données issues du document « Guide relatif à la procédure de marinisation de machines de type NRE et de moteurs équivalents tels que des moteurs de poids-lourds (EURO VI) et à la vérification de l'éligibilité pour l'installation de tels moteurs à bord de bateaux de navigation intérieure »

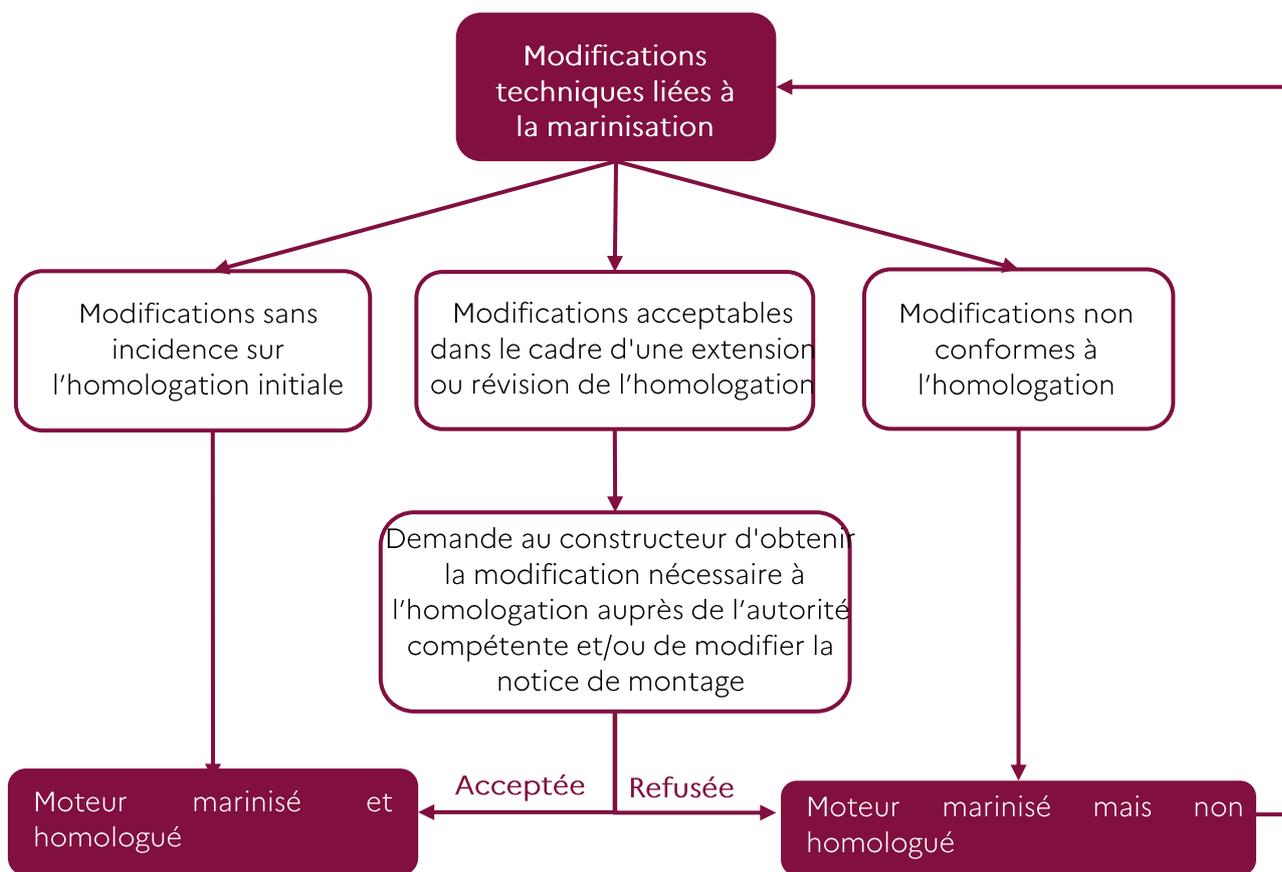
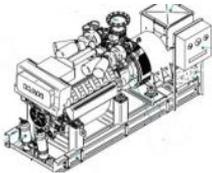


Figure 12 : Synoptique de la marinisation et l'homologation

L'ensemble des moteurs marinisés est répertorié sur le site du CESNI¹³.

En 2024, une étude sur la disponibilité des moteurs gaz marinisés a été réalisée par 2C Consulting et commandée par GRDF et VNF[4]. Les conclusions sont présentées ci-dessous.

A ce jour, un seul moteur à gaz, homologué et marinisé, est disponible : le moteur MAN E2862 Stage V, homologué pour la propulsion (IWP) ou les auxiliaires (IWA). Ce moteur de 495kW n'est disponible qu'en version groupe électrogène.

MAN ROLLO – E2862 495kW (GE)

12 cylindres en V
Homologué Stage V en IWP et IWA
495kW (1800 RPM) / 478 kW (1500 RPM)
Environ 500k€ (en version groupe électrogène seulement)

¹³ <https://listes.cesni.eu/2060-fr.html>

Il est techniquement possible de mariner d'autres moteurs gaz routier, dans un délai inférieur à six mois et pour un coût estimé entre 100k€ et 300k€. Cependant, la stratégie de diversification de l'offre des motoristes pour le secteur fluvial n'est pas envisagée à date. Ceci est dû aux investissements nécessaires pour mariner un moteur gaz existant, et à la petite taille du marché fluvial, rendant le développement de moteur gaz marinisé et homologué peu attrayants pour les motoristes. De plus, les motoristes refusent généralement toute modification de leurs moteurs, en partie parce que les impacts de la marinisation sur les moteurs GNV ne sont pas ou mal maîtrisés.

Aujourd'hui seuls 2 moteurs d'une puissance proche des besoins[11], [16], [19] semblent avoir le potentiel d'être commercialisés à relativement court terme :

EUROPE SERVICE - AV MAG R756	NGV POWERTRAIN - FP087
	
6 cylindres en ligne	6 cylindres en ligne
4,5 litres de cylindrée	8,7 litres de cylindrée
92kW	230kW
Environ 35K€ (base moteur seule)	Environ 60K€ (base moteur seule)

Les armateurs tendent à avoir des unités standardisées, pouvant être utilisées sur d'autres bassins de navigation voir d'autres usages et ceci afin de limiter les coûts (études, constructions neuves ou remotorisations et exploitations) et de garder une valeur marchande en cas de revente de l'unité à d'autres armateurs.

Une étude détaillée sur les modifications techniques apportées par la marinisation des moteurs gaz pourrait lever certaines inquiétudes, et faciliter le travail des motoristes pour développer des moteurs gaz supplémentaires.

2.5.2. L'avitaillement

2.5.2.1. Les différents types d'avitaillement en GNC

Station d'avitaillement bord à quai

Les stations d'avitaillement GNC pour le fluvial ont une configuration proche de celles utilisées pour l'avitaillement de véhicules routiers. Elles comportent :

- Un poste de livraison gaz, raccordé au réseau de distribution (avec une pression de livraison généralement autour de 3 bars)
- Eventuels dispositifs de filtration/ séchage du gaz
- Un ou plusieurs compresseur(s), – permettant de remonter la pression à 200 bars (pression de stockage sur véhicule routier et bateau) ou plus généralement à 250 voire 300 bars (pression du stock tampon),

- Un stockage haute pression – qui sert au remplissage « rapide » en station routière publique, par équilibrage de pression. En station fluviale il pourrait ne servir que de réservoir « tampon », le remplissage étant conditionné par le débit de compression
- Un ou plusieurs appareil(s) de distribution, équipé d'un flexible et d'un connecteur permettant de raccorder le bateau à la station
- L'ensemble des réseaux (gaz, électricité...) et dispositifs de sécurité

Il s'agit de technologies matures et très bien maîtrisées.

Pour un avitaillement fluvial il est nécessaire d'installer un poste d'accostage (ou construire un quai) permettant au bateau de s'avitailler.

Il est également possible de profiter de quais existants – comme cela est envisagé au sein de l'étude Bélière (quais privés et sécurités au sein du site industriel Vicat).

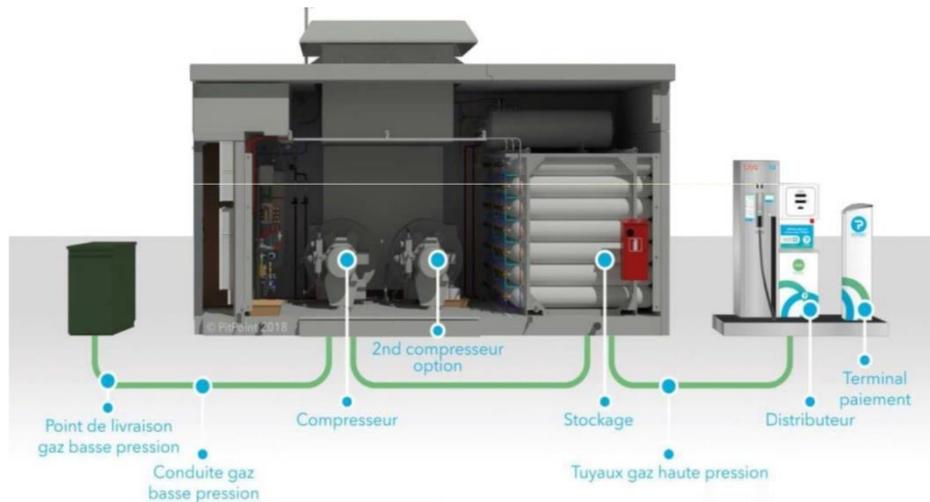


Figure 13 : Synoptique d'une station d'avitaillement GNC

On peut distinguer 2 types de stations :

Les stations de petite taille ou charge lente :

Ces stations sont constituées d'un compresseur d'un débit faible (qui peut même être inférieur ou égal à 80Nm³/h afin de rester en deçà du régime de déclaration ICPE), et ne comportent généralement pas de stockage – permettant de minimiser le coût total de l'installation. Il s'agit de la configuration de la station des bateaux-promenades sur les canaux d'Amsterdam (1 compresseur de 110Nm³/h et un poste à quai dédié permettant à 2 bateaux de faire le plein simultanément).

Le temps de charge est en revanche long : par exemple 8h pour le 150kg de consommation journalière[22], nécessitant un stationnement à quai prolongé du bateau (par exemple pendant la nuit). Ces stations sont généralement privées et dédiées à un ou quelques bateaux d'un même armateur. Les dispositions sécuritaires spécifiques d'un avitaillement sans présence permanente de personnel n'ont pas été étudiées au sein des projets (point mentionné au sein de l'étude Pousseur Bélière).

Les stations de charge rapide :

Ces stations sont constituées d'un ou plusieurs compresseurs avec un débit total généralement compris entre 1500 et 2000Nm³/h (afin de rester en deçà du seuil ICPE de l'autorisation). Les stations de charge rapide permettent d'atteindre une durée de remplissage intéressante :

- 40min pour 862kg de gaz pour une station avec un débit de compression de 2000Nm³/h,
- 1h30 pour 1,9T de gaz pour une station avec un débit de compression de 2000Nm³/h.

Des stations avec un débit supérieur existent – par exemple 3900kg/h : il en existe notamment sur des dépôts de bus en Ile de France. Néanmoins les points de vigilance suivants – non évoqués dans la bibliographie – sont à prendre en compte :

- Un débit > 2000Nm³/h suppose une demande d'autorisation environnementale au titre des ICPE, et donc : une procédure plus complexe (instruction par la DREAL), coûteuse, avec des délais supplémentaires et des potentielles mesures compensatoires supplémentaires à mettre en place en fonction des études de danger (par exemple murs coupe-feu)
- Des coûts d'investissement et d'exploitation (maintenance) très importants, qui ne sont supportables qu'en cas de consommation suffisante (comme c'est le cas dans un dépôt de 200 bus par exemple).
- De tels débits supposent un dimensionnement adéquat de l'ensemble du linéaire de tuyauterie, depuis la compression jusqu'au stockage embarqué sur le bateau.

La mise en place de « station fille »

L'utilisation de station fille (évoquée notamment dans l'étude « Bacs de Seine ») peut également être envisagée. Elle consiste au transport de gaz sous pression, transporté depuis une station GNC « mère » par camion, vers une station « fille » qui permet de remplir les bateaux. Une telle solution permet de s'affranchir de l'absence de réseau gaz à proximité. Elle n'est néanmoins pas envisagée dans les autres projets, au profit d'une solution d'avitaillement direct par camion.

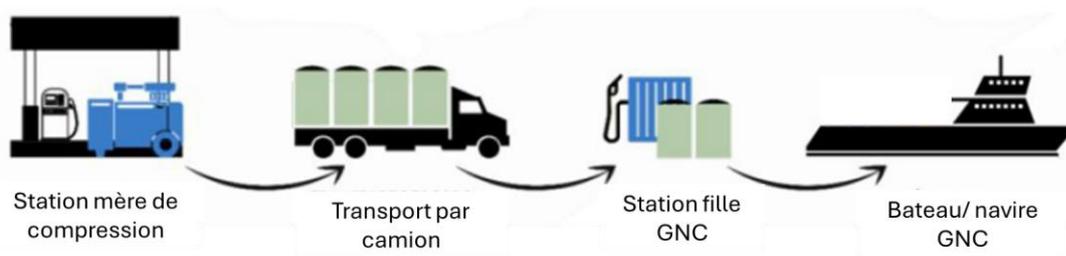


Figure 14 : Schéma d'avitaillement avec une station fille

Avitaillement par camion avitailleur

L'avitaillement par camion avitailleur permet d'avitailer des bateaux de manière plus flexible, sans nécessiter de station d'avitaillement fixe, notamment dans les cas où l'avitaillement doit se faire dans des zones distantes du réseau GRDF.

Le principe est le suivant :

- Remplissage des réservoirs du camion à une station d'avitaillement (p.ex une station publique à destination de véhicules routiers). Il est néanmoins à noter que l'impact sur le débit résiduel à destination des véhicules routiers n'est pas abordé dans la bibliographie. Le camion (généralement un tracteur routier) doit être homologué ADR. Des réservoirs de 300 bars sont envisagés pour certains projets étudiés, néanmoins cela pose la question de la possibilité de les remplir à une telle pression, les stations publiques GNC étant conçues pour alimenter des véhicules avec des stockages embarqués à 200 bars (et un débit en sortie de compression à 250 – très majoritairement, voire 300 bars maximum)
- Remplissage du bateau directement depuis le camion-avitailleur (avec un flexible et raccord adaptés) par équilibrage de pression puis par l'emploi éventuel d'un surpresseur (également appelé « booster »).

Bien que ne nécessitant pas de station soumise aux ICPE, ces opérations de remplissage requièrent le respect de normes et procédures de sécurité : respect d'un zonage ATEX, utilisation d'explosimètre, extincteurs, différents dispositifs de sécurité au sein du camion

avitailleur (arrêt d'urgence, détection de surpression, de fuite, raccord cassant / break-away etc.).

Les opérations « Truck to ship » GNL sont effectuées dans les principaux ports en France (p.ex navires Corsica Linéa à Marseille, drague Samuel de Champlin au port de Nantes St Nazaire, drague aspiratrice Scheldt River au port de Brest). Cela permet de bénéficier de retours d'expérience transposables aux opérations de remplissage « truck to ship » GNC.

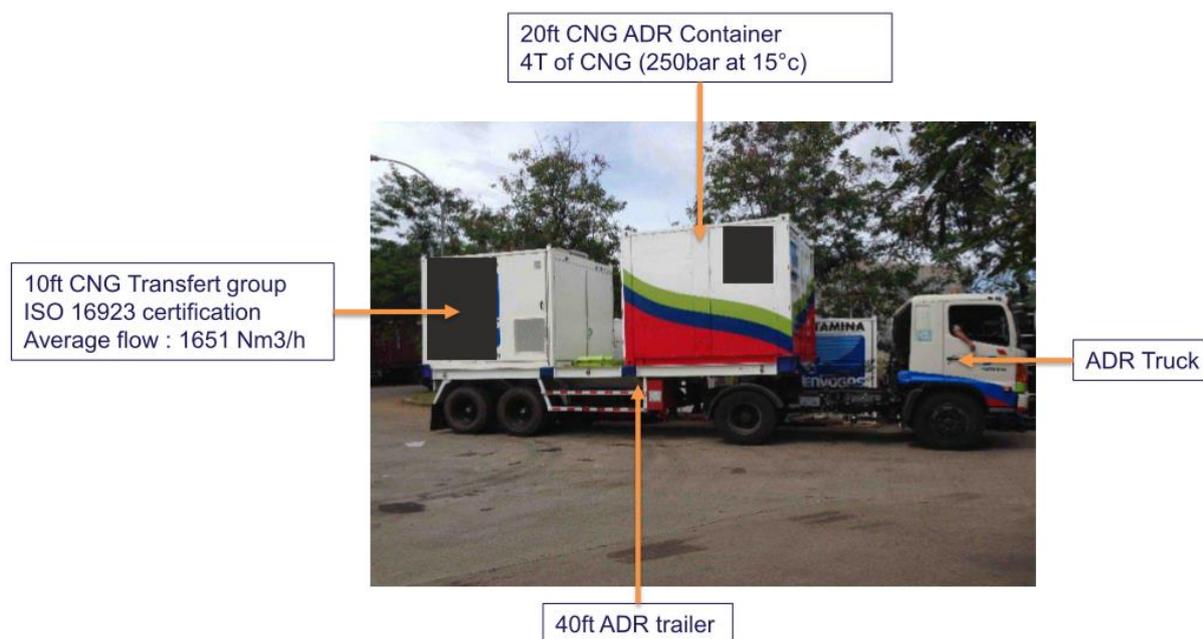


Figure 15 : Camion avitailleur muni d'un container de stockage, et d'un container de « transfert » incluant un compresseur

Avitaillement par transfert de container

Cette solution est proche de celle du camion-avitailleur : elle consiste à remplir un container de gaz au sein d'une station fixe d'avitaillement, puis de le transporter par camion jusqu'à un quai avant de transférer le contenu du container placé dans le camion vers le bateau à l'aide d'une grue (pouvant éventuellement être intégrée au camion). Ces solutions sont notamment envisagées pour des bateaux et navires fonctionnant à l'hydrogène (par exemple le projet HydrOmer d'un dragueur à Port la Nouvelle).

En plus des avantages du camion-avitailleur, cette solution permet en théorie d'atteindre des durées d'avitaillement plus courtes (le transfert du container étant plus rapide qu'un transfert de gaz entre 2 stockages). **L'opération de transfert d'un container** de 20 pieds/ 4 tonnes de gaz, pourrait s'effectuer en 30minutes, en comprenant le déchargement et le chargement, contre prêt de 3h avec une station d'avitaillement de débit 2000Nm3/h.

Néanmoins cette solution, envisagée dans plusieurs projets mais non privilégiée, requiert d'être étudiée attentivement afin de prendre en compte les risques de choc lors du transbordement (ainsi que ceux de fuite, incendie ou explosion associés), et les modalités de raccordement (type de raccord, flexible de raccordement).

Une autre contrainte non évoquée dans la bibliographie est celle de l'intégration sur le bateau, qui doit pouvoir accueillir le stockage au bon format sur son pont, tandis qu'en cas de stockage fixe celui-ci peut être mieux intégré (par exemple en soute, où il peut participer à une meilleure stabilité de l'unité).

2.5.2.2. L'avis des utilisateurs

L'étude AVICAFE[3] étudie notamment les pratiques actuelles d'avitaillement et présente également les retours des utilisateurs sur leurs préférences :

- **Avitaillement par bateau** : Les utilisateurs y trouvent une offre de service très complète incluant la récupération des huiles usagées, et l'approvisionnement en eau potable.
- **Avitaillement sur station fixe** : Certaines stations sont très bien situées géographiquement (en centre-ville), ce qui permet aux bateliers d'optimiser le trajet pour faire leurs courses par exemple. Les stations ont aussi des magasins, où les bateliers trouvent des produits variés pour leur activité fluviale.
- **Avitaillement par camion** : cette solution présente un gain économique certain. Cependant, seule une minorité de bateliers estiment que ce type d'avitaillement leur permet de gagner du temps, à condition qu'il s'agisse d'un camion avec une grande capacité. Les camions de petite capacité prennent plus de temps pour faire le plein étant donné le nombre de camion nécessaire pour assurer l'avitaillement complet du bateau. La notion de temps d'avitaillement est particulièrement importante dans les cas remontés.

2.5.3. Le stockage

2.5.3.1. Réservoir

Le bioGNC est stocké dans des réservoirs ayant les caractéristiques suivantes :

- **Matériaux** : en matériaux composite de type IV, à base de fibre de carbone ou de type III (tout en acier).
- **Température** : 15°C // conditions normales de température.
- **Pression** : 200 ou 250 bars. Faire passer le bioGNC à l'étage de compression supérieur n'est pas pertinent en raison de l'énergie nécessaire.

Dans ces conditions, 95 % du volume de gaz stocké est effectivement utilisable.

Les bouteilles doivent avoir un faible diamètre afin de limiter la contrainte mécanique dans le matériau. Ainsi, plus la pression est élevée, plus le diamètre de la bouteille doit être faible. Le stockage gaz devant répondre au classement au feu SOLAS 60, les caractéristiques doivent être à minima les suivantes :

- **Acier ou matériau équivalent** d'épaisseur est de $4,5 \pm 0,5$ mm. : des bouteilles en acier, aluminium et en composite existent pour stocker le bioGNC.
- **Renforcement anti-flexion approprié**, où la distance entre les agrégats doit être d'environ 600 mm.
- Fabriqué à partir de **matériaux incombustibles** approuvés, de sorte qu'en 60 minutes, l'augmentation moyenne de la température de la face arrière ne dépasse pas 140 °C et que l'augmentation de la température de n'importe quel point de la face arrière ne dépasse pas 180 °C.

2.5.3.2. Implantation

Dans le but de limiter les dommages en cas de collision, le stockage bioGNC et les tuyauteries de transports ne doivent pas être localisées à moins de 1 mètre des bords de l'unité et à moins de 0,60 mètre de la quille.

Deux principales solutions sont possibles pour l'emplacement du stockage :

Tableau 9 : Implantation possible du stockage

Type de stockage	Présentation	Emplacement possible
Sur racks	<ul style="list-style-type: none"> • 1 voire 2 racks de bouteilles. • Une dizaine de bouteilles par rack maximum est recommandé. • Peut-être fixe ou mobile. • Solution adaptée seulement pour les faibles besoins en carburant. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cale (<u>fluvial et maritime</u>) • Sur le pont (<u>uniquement en fluvial</u>)
Conteneurisé	<ul style="list-style-type: none"> • Peut-être fixe ou mobile. • Le conteneur peut être ajouré ou non. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cale (<u>fluvial et maritime</u>) • Sur le pont (<u>uniquement en fluvial</u>)

L'analyse réglementaire montre qu'il est moins contraignant de placer le réservoir sur le pont car cela répond aux contraintes importantes de distance au fond, au franc bord, en ventilation et en équipements de sécurité. Celui-ci devra être éloigné des logements et des zones de chocs potentiels.

Tableau 10 : Avantages et inconvénients des différentes implantations du stockage

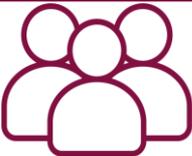
Avantages	Inconvénients
Implantation près des moteurs	
Moins de tuyauterie	<ul style="list-style-type: none"> • Déséquilibre hydrostatique • Absence de séparation avec les sources de chaleur • Proximité avec des zones où les incendies sont possibles • Proximité avec les lieux de présence du personnel, en fonction de la configuration du bateau, • Pertes de place en cale plus élevées, en fonction de la configuration du bateau
Implantation à l'opposé du moteur (généralement à l'avant)	
<ul style="list-style-type: none"> • Préservation de la balance hydrostatique • Séparation avec les sources de chaleur • Séparation avec des zones où les incendies sont possibles • Eloignement des lieux de présence du personnel, en fonction de la configuration du bateau, • Limitation des pertes de place en cale plus élevées, en fonction de la configuration du bateau ou navire 	Linéaire de tuyauterie plus élevé

L'implantation du stockage doit également être décidée en tenant compte du type de bateau ou navire, de l'implantation des anciens équipements diesel (en cas de remotorisation), des lieux de présence du personnel ou des passagers et du volume de stockage nécessaire à l'exploitation.

Par exemple, dans le cas de l'exploitation de navire de pêche, l'espace disponible en cale est déterminant pour son équilibre économique. Le stockage en cale empiète donc directement sur le volume disponible. Les navires supérieurs à 15m perdraient un volume trop important[9] dans la cale à poisson. Le stockage sur le pont pose quant à des problèmes de stabilité et de manque d'espace disponible. Un compromis doit être trouvé.

2.5.4. Les éléments de sécurité à considérer

Au travers des différents projets, voici les éléments techniques de sécurité à considérer, en plus d'une signalétique adaptée :

	<p>Stockage gaz</p> <ul style="list-style-type: none">• Détection méthane• Détection incendie• Protection contre les dommages (mécaniques et environnements)• Classement au feu SOLAS A60• Extincteurs dans et l'extérieur du local (si stockage en pièce fermé)• Ventilation du local• Epreuve périodique sur les bouteilles et détecteur gaz• Inspection périodique de l'environnement proche des bouteilles de stockage (par l'équipage et par une personne agréée)
	<p>Tuyauterie et flexible de transport du GNC</p> <ul style="list-style-type: none">• Redondance de la tuyauterie (bâbord et tribord), de la vanne d'arrêt GNC• Comparaison du flux entrant et sortant• Protection contre les dommages mécaniques :<ul style="list-style-type: none">• <i>Tuyauterie double paroi avec détection de vide et CH4 et soupapes de surdébit</i>• <i>Grille de protection</i>• <i>Conception des tuyauteries et flexibles pour les conditions (250 bars, 15°C)</i>• <i>Première étape de décompression à la sortie du réservoir GNC : 250 à 20 bars</i>• <i>Attention particulière sur les coudes</i>
	<p>Sécurité du moteur</p> <ul style="list-style-type: none">• Local aux normes ATEX gaz• Détecteurs méthane et incendie• Protection contre les dommages (mécaniques et environnements)• Classement au feu SOLAS A60• Extincteurs dans et l'extérieur du local (si stockage en pièce fermé)• Ventilation du local• Homologation Stage V (IWP, IWA ou NRE) ou IMO Tier III• Inspection périodique de l'environnement proche du moteur (par l'équipage et par une personne agréée)
	<p>Formation de l'équipage</p> <ul style="list-style-type: none">• S'inspirer de l'existant :<ul style="list-style-type: none">• <i>Formation d'initiation au GNV/BioGNV, sécurité et exploitation</i>• <i>Maintenance Niveau 1 et Niveau 2</i>• <i>Station GNV Niveau 1 et Niveau 2</i>

2.5.5. L'impact du GNC sur l'exploitation

2.5.5.1. Densité énergétique du bioGNC

Actuellement, la majorité de la flotte fluviale en France utilise des moteurs Diesel fonctionnant au Gazole Non Routier (GNR). D'autres types de motorisation plus écologiques sont en développement : moteurs fonctionnant au bioGNC, moteurs électriques (y compris des versions hybrides et des moteurs à pile à combustible). Cependant, quel que soit le carburant alternatif choisi, il y a généralement une diminution de la densité énergétique. Sans optimisation énergétique ou ajustement des cycles de navigation, un compromis doit être trouvé entre la perte d'autonomie et la réduction du volume de charge utile disponible.

Les densités énergétiques des principaux carburants sont présentées sur le graphique ci-dessous :

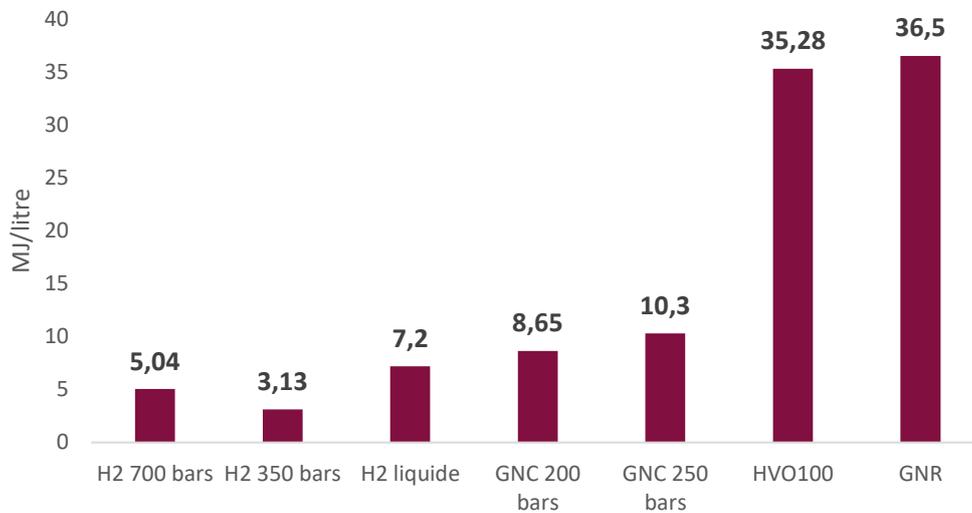


Figure 16: densité énergétique des carburants[23]

Les performances énergétiques et environnementales du bioGNC sont donc à confronter au volume que le bioGNC occupe. Ainsi, pour un même volume énergétique, le volume de BioGNC sera 3,5 à 4,2 fois plus élevé que le GNR. Ce ratio ne prend pas en compte les dispositions spécifiques au stockage GNC (en bouteilles, et non en cuve comme le GNR) – qui ne peut s'adapter exactement à l'emplacement du réservoir GNR du fait de la forme cylindrique de son stockage.

2.5.5.2. La relation vitesse/consommation énergétique

L'appel de puissance et la consommation énergétique d'un bateau ne sont pas proportionnels à la vitesse mais exponentiels – du fait des forces de frottement de l'eau. En plus de la vitesse, la profondeur et la largeur du canal font varier le débit, ce qui a un impact direct sur les puissances et donc la consommation de carburant.

Ces courbes montrent une consommation « en route » et hors écluses, de 5 à 7 litres/heure en petit Canal profondeur 2m (puissance de 25-30 CV), jusque 50 litres/heure en Seine profondeur 4m (puissance moteur 250 CV), soit une plage de 1 à 10 pour la consommation « en route » en eau calme en raison du confinement de la voie d'eau, à quoi il faut encore ajouter l'effet du courant.

On observe que, en canal, la consommation à la tonne est de l'ordre de 250 kJ/T.km quel que soit le canal lorsqu'il est restreint (courbes rouge et vertes les plus à gauche).

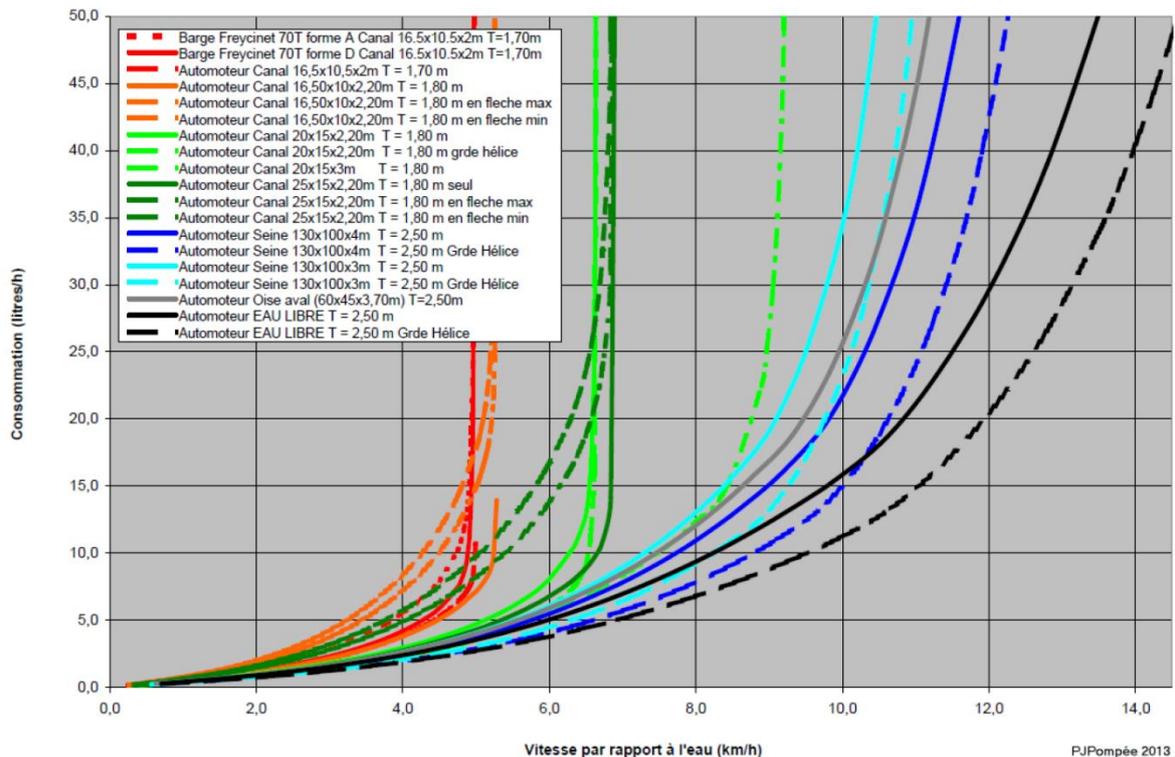


Figure 17 : Consommation de carburant (GNR) par rapport à la vitesse[24]

Ainsi, l'augmentation de la consommation et de la puissance nécessaire semble exponentielle face à l'augmentation de la vitesse.

Le dimensionnement et le type de motorisation sont donc déterminés en tenant compte de plusieurs scénarios. Il semble pertinent de détailler, lors des études de faisabilités, le dimensionnement de l'architecture propulsive selon plusieurs niveaux de crue, par exemple :

- Un scénario sans courant,
- Un scénario avec courant,
- Un scénario en grande crue.

De manière générale, les performances de la motorisation sont sensibles aux conditions de navigation (temps d'exploitation, fréquence d'avitaillement, confinement du canal, vitesse de navigation moyenne, vitesse de navigation maximale, ...), influant donc sur le choix de l'architecture propulsive pertinente, que ce soit pour les motorisations au GNC ou au GNR. Les performances globales peuvent être fortement impactées :

- Rendement du groupe moteur,
- Couverture des besoins pour les pointes de vitesse,
- Gestion de la distance au point d'avitaillement,
- Gestion du temps d'avitaillement: par exemple, dans le cas des bacs de Seine[25] (croisière), le temps d'avitaillement entre deux croisières en journée est réduit, contrairement au temps d'avitaillement possible la nuit.

La prise en compte de la typologie du bateau et de son cycle d'exploitation est nécessaire pour un dimensionnement ad hoc de l'architecture propulsive. De même qu'il sera parfois nécessaire de questionner le cycle d'exploitation pour réaliser un dimensionnement raisonnable d'un point de vue technique, environnemental et économique.

2.6. La faisabilité économique

A retenir :

- Les technologies de motorisation gaz sont des technologies déjà existantes dans d'autres secteurs d'activité, rendant le temps et les efforts pour le développement de solution bioGNC relativement faibles en comparaison d'autres alternatives au GNR.
 - Les armateurs cherchent à standardiser leurs flottes afin de limiter les coûts (études, stations d'avitaillement) et de garder une valeur marchande en cas de revente du bateau.
 - Dans le cas d'une architecture propulsive 100% GNC, la variance de coût est principalement portée par le volume du stockage, répondant à un besoin d'autonomie spécifique.
 - Dans le cas d'une architecture propulsive hybride GNC-électrique, la variance de coût est principalement portée par le pack de batteries. Le choix des batteries recyclés est pertinent.
- L'hybridation GNC-électrique, bien que plus coûteuse que la solution 100% bioGNC, permet plus de flexibilité dans l'exploitation et permet de s'adapter aux évolutions réglementaires (ZFE, rejets, ...). C'est une solution de transition progressive (le passage au 100% électrique ou à l'hydrogène d'ici quelques années, serait ainsi facilité).

2.6.1. Le coût du carburant

2.6.1.1. Prix du GNR et évolution

Selon E2F (Entreprises Fluviales de France)[26], le prix du gazole pour les transporteurs fluviaux est passé d'un prix moyen en 2021 de 0,583 € HT par litre de GNR à 1,253 € HT par litre en mars 2022, soit un doublement du prix. Si l'on prend comme référence le prix au 1er janvier 2021 (0,446 € HT/l) les prix ont quasiment triplés. Cependant, cette période a connu des facteurs extérieurs déstabilisant le marché.

En outre si l'on compare l'évolution des prix du gazole non routier (GNR) à celui du gazole routier on constate que le transport fluvial subit un différentiel d'augmentation significatif :

- Entre janvier 2021 et février 2022, les prix HTVA ont augmenté de 180 % pour les entreprises de transport fluvial et de 68 % pour les entreprises du transport routier, soit un différentiel de 112 points, qui influe sur les conditions de marché et le choix modal des chargeurs.
- En cause l'effet « amortisseur » des taxes sur le carburant que paient les transporteurs routiers (TICPE) et pas les transporteurs fluviaux. De fait la hausse a été beaucoup plus lissée pour les transporteurs routiers.

Le carburant représentait environ 25 % du coût de revient d'une prestation de transport fluvial avant la crise. Aujourd'hui, ce pourcentage est passé à 48 %, en supposant que les autres facteurs restent inchangés.

En se basant sur l'augmentation des prix constatée entre 2021 et 2022 par E2F et sur les scénarios 2 et 4 du rapport Transitions 2050 de l'ADEME[27] (hors évolution de la taxe carbone), nous établissons une hausse du prix du GNR est d'environ +100% d'ici 2030 et +200% d'ici 2040, par rapport au point de référentiel de **2022**, soit 1,253 € HT :

Tableau 11 : Scénarios des prix du baril de Pétrole entre 2020 et 2050 (Scénarios Transitions 2050 - ADEME)

Pétrole	2020	2030	2040	2050
Tendanciel	100	176	240	328
S2	100	209	306	457
S4	100	211	307	416

Ainsi, la trajectoire économique prévisionnelle retenue du GNR présente un coût en 2030 de 2,51€/L et 3,76 €/L en 2040 :

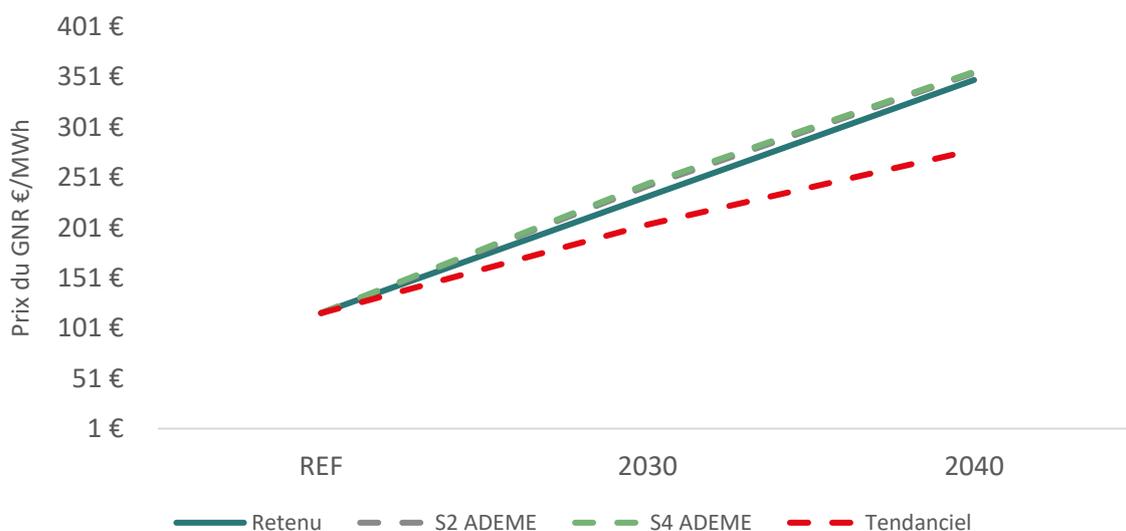


Figure 18 : Modèle retenu d'évolution du prix du GNR

Il est à noter qu'en fonction des différents accords d'achat, les coûts de référence et projeté peuvent varier sensiblement.

2.6.1.2. Prix du bioGNV et évolution

Nous pouvons décomposer le prix du bioGNV en :

- **Un tarif de référence du point d'échange gaz (PEG) :** le prix de la molécule (PEG) était de l'ordre de 50 €/MWh en décembre 2023. Il est tombé à 25€/MWh au plus bas, avant de retourner, en mars 2024, autour de 30€/MWh. Etant donné les sources d'approvisionnement actuels, qui sont désormais du GNL (gaz naturel liquéfié) venant majoritairement du gaz de schiste américain¹⁴, le coût du gaz est plus cher (extraction, transport) que lorsque le gaz venait de Russie ; aussi un montant du PEG à 25€/MWh semble être un montant en dessous duquel il est peu probable que le gaz descende à l'avenir. L'hypothèse retenue correspond à des prix réels, pratiqués par les professionnels du transport bénéficiant de tarifs d'achats. On considère ainsi un prix de référence à **40€/MWh**, qui correspond également aux prix de 2020, année initiale des prévisions de l'ADEME et des scénarios Transitions 2050.
- **Une Taxe Intérieure de Consommation sur le Gaz Naturel :** Les réglementations récentes ainsi que les orientations de programmation de l'énergie pour les années à venir sont tournées vers une sortie du gaz naturel. Parmi les impacts de ces orientations, se trouvent

¹⁴ Selon le Service des Données et Etudes Statistiques, 2022

l'augmentation de la taxe intérieure de consommation sur le gaz naturel (ex-TICGN), publié en fin 2023, pour le gaz naturel à usage de combustible. Dans le cas d'un usage en tant que carburant, la taxe intérieure est à **5,23 €/MWh**, que l'on considère stable sur la durée de notre projection¹⁵.

- **Un prix de la Garantie d'Origine du biométhane** : ce mécanisme est utilisé pour financer la filière biométhane (la traçabilité du biométhane injecté dans le réseau de gaz, puis consommé, se fait grâce aux garanties d'origines). On estime le surcoût de la garantie d'origine à **8€/MWh**, stable sur la durée de notre projection. Cependant, un risque d'augmentation est à prévoir avec l'ouverture au marché européen.
- **La taxe carbone** : l'évolution de la taxe carbone n'est pas prise en compte ici étant donné la difficulté à estimer son calcul et sa projection.

Pour construire nos trajectoires, nous nous basons sur les prix de références et sur les scénarios 2 et 4 du rapport Transitions 2050 de l'ADEME[27] :

Tableau 12 : Scénarios des prix de biométhane entre 2020 et 2050 (Scénarios Transitions 2050 - ADEME)

Biométhane	2020	2030	2040	2050
Tendanciel	100	102	107	107
S2	100	108	104	104
S4	100	101	89	80

La trajectoire retenue atteint ainsi un prix d'environ 66 €/MWh en 2030 et 63 €/MWh en 2040. Néanmoins, l'évolution à long terme et la suppression des mécanismes de soutien budgétaire du biométhane, font que ces prix pourraient augmenter plus que prévu.

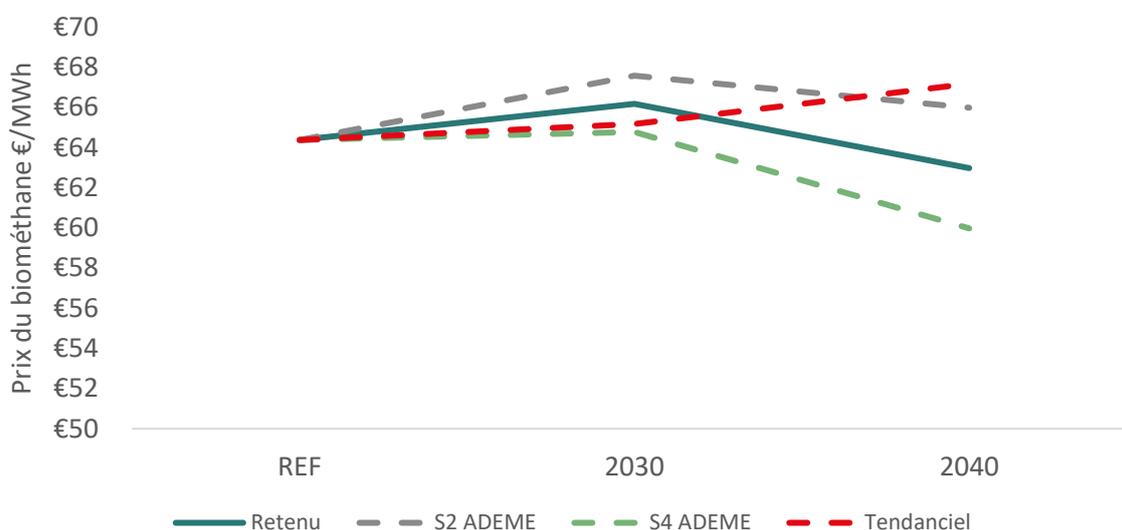


Figure 19 : Modèle d'évolution du prix du biométhane retenu

Ils peuvent par ailleurs être confortés par l'étude Européenne de BIP Europe [28].

¹⁵ Guide 2024 sur fiscalité des énergies, ministère de l'Économie, des finances et de la Souveraineté industrielle et numérique

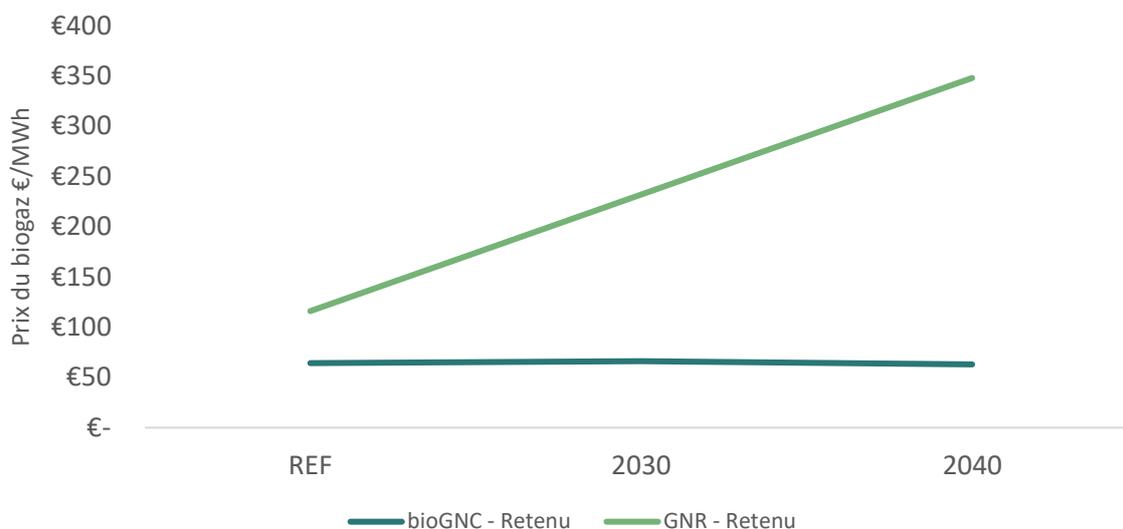


Figure 20 : Modèle retenu d'évolution du prix du GNR et du bioGNC

Les exercices de projection de coûts sont toujours délicats à faire, surtout sur le marché énergétique Européen. Ces coûts n'intègrent pas les événements exceptionnelles (guerres, catastrophes naturelles, ...).

2.6.2. Analyse comparative et mise en lumière des coûts et surcoûts induits

Les coûts induits à une architecture propulsive peuvent être décomposés en deux facteurs :

- Les équipements relatifs aux choix de l'architecture propulsive,
- Les études nécessaires au développement et à la conception.

Dans les paragraphes ci-après, nous présentons les surcoûts induits des solutions 100% GNC et hybridation GNC-électrique, par rapport à une solution GNR. Ces surcoûts, applicables en construction neuves et en remotorisation, présentent une estimation globale issue de plusieurs estimations d'études, sur plusieurs types de chantier. **Une étude spécifique est nécessaire à chaque projet.**

Par ailleurs, les entretiens des acteurs de la filière ont montré que les armateurs sont en quête de standardisation afin de limiter les coûts et garder une valeur marchande en cas de revente du bateau.

2.6.2.1. Coûts des études

Pour développer une propulsion 100% GNC ou une solution hybride électrique, des études spécifiques sont nécessaires. Le coût de ces études varie en fonction du type de bateau ou navire, de l'architecture propulsive, du cycle de navigation ou encore de l'usage.

D'après les projets analyse, le coût des études peut être estimé entre 200 000€ et 500 000€. Il est important de souligner que les coûts de développement des moteurs gaz dépendent entièrement des motoristes, de leur volonté d'investir dans le secteur fluvial et maritime côtier, et de l'état d'avancement de leurs recherches. Si un moteur doit être développé à partir de zéro, cela implique un travail complet de conception, de mise au point et d'homologation, avec un budget estimé à au moins 1 million d'euros.

En revanche, le coût du développement du moteur gaz présenté ci-dessous, provient des consultations auprès de NGV Powertrain, CRMT et Europe Service. Ainsi, les coûts couvrent uniquement le développement spécifique à la marinisation, ainsi que l'homologation et la certification, partant d'une base de moteur gaz routier déjà existante.

Tableau 13 : Coûts des études spécifiques au bioGNC

Etudes	Coûts (k€)	Relatif à
Conception générale	15k€ - 30k€	Tout projet
Développement moteur gaz déjà existant mais non marinisé	100k€ - 355k€	Architecture 100% GNC Architecture hybride GNC-électrique
Partie électrique	25k€ - 35k€	Architecture hybride GNC-électrique
Partie gaz	25k€ - 35k€	Architecture 100% GNC Architecture hybride GNC-électrique
Analyse de risque	15k€ - 25k€	Tout projet
Etude de chantier	15k€ - 20k€	Tout projet
TOTAL ETUDES (hors aléas)	170k€ - 470k€	Architecture 100% GNC
	190k€ - 500k€	Architecture hybride GNC-électrique

En prenant en compte les aléas, estimés à 30% du total, le coût des études spécifiques pour le développement de motorisations pourrait s'élever jusqu'à 650 000 €. Cependant, il est important de noter qu'une part significative de ces coûts (50% à 70%) est attribuable au développement du moteur gaz non marinisé. Une grande partie de ces frais est supportée une seule fois par le motoriste pour une gamme de moteur donnée. Par conséquent, pour une flotte de bateaux ou de navires ayant une architecture propulsive similaire, le coût global des études peut être considérablement amorti.

2.6.2.2. Décomposition des coûts de l'architecture propulsive et de sa marinisation

Tout comme pour les études, nous considérons ci-après seulement les coûts spécifiques liés aux composants des architectures propulsives 100% GNC et hybride GNC-électrique. Ainsi, certains équipements, comme les propulseurs d'étrave ou les azimutaux (Z-drive) n'ont pas été reportés.

En état actuel, il n'existe pas encore de prescriptions techniques dans le règlement européen. Ainsi, plusieurs éléments ont été laissés à l'appréciation des bureaux pouvant induire des grandes variations, voire une non prise en compte, dans le chiffrage. C'est par exemple le cas des éléments de sécurité, détecteur et alarmes. Pour des besoins de redondance, gage de sécurité en cas d'avarie, nous avons considéré 2 moteurs / générateurs.

Tableau 14 : Coûts des équipements spécifiques au bioGNC

Équipements	Coûts (k€)	Relatif à
Moteurs GNC* développés	120k€ - 200k€	Architecture 100% GNC Architecture hybride GNC-électrique
Mise en groupe générateur	75k€	Architecture hybride GNC-électrique
Réseaux gaz	15k€	Architecture 100% GNC Architecture hybride GNC-électrique
Stockage bioGNC 200 bars*	160k€ - 250k€	Architecture 100% GNC
Stockage bioGNC 200 bars*	40k€ - 200k€	Architecture hybride GNC-électrique
Batteries* neuves	800k€ - 1 000k€	Architecture hybride GNC-électrique
Batteries* recyclées	150k€ - 250k€	Architecture hybride GNC-électrique
Câblage système dont monitoring, pose des protections, alarmes et sécurités	50k€ - 100k€	Architecture 100% GNC Architecture hybride GNC-électrique
Création réseaux de ventilation (stockage gaz et batterie)	30k€	Architecture 100% GNC Architecture hybride GNC-électrique
TOTAL équipements (hors aléas)	375k€ - 595k€	Architecture 100% GNC
	480k€ - 1 590k€	Architecture hybride GNC-électrique

*Coûts directement dépendant de la taille du bateau/navire, de l'usage et de l'autonomie. Pouvant aller du simple au triple en fonction des hypothèses gardées pour le dimensionnement.

Dans le cas de l'architecture hybride GNC-électrique, le coût du pack batterie représente plus des 2/3 du prix des équipements. Il est possible d'utiliser des batteries recyclées afin de faire baisser significativement ces coûts. Il est cependant possible que la durée en soit réduite. Par ailleurs, le coût du stockage bioGNC est réduit, au profit des batteries.

Dans le cas de l'architecture 100% GNC, le volume de stockage est augmenté, afin de répondre aux exigences d'autonomie.

2.6.2.3. Synthèse des coûts

Tableau 15 : Synthèse des coûts spécifiques au bioGNC

Equipements et études	Coûts (k€)	Relatif à
Recherche et développement moteur GNC – dont homologation	100k€ - 355k€	Architecture 100% GNC Architecture hybride GNC-électrique
Autres études	95k€ - 145k€	Architecture 100% GNC Architecture hybride GNC-électrique
Motorisation	120k€ - 275k€	Architecture 100% GNC Architecture hybride GNC-électrique
Stockage et batteries	150k€ - 1 200k€	Architecture 100% GNC Architecture hybride GNC-électrique
Autres équipements	95k€	Architecture 100% GNC Architecture hybride GNC-électrique
TOTAL (hors aléas)	545 k€ - 1 065 k€	Architecture 100% GNC
	670 k€ - 2 090 k€	Architecture hybride GNC-électrique

Les technologies de motorisation gaz sont des technologies déjà existantes dans d'autres secteurs d'activité, rendant le temps et les efforts pour le développer relativement faibles en comparaison d'autres alternatives au GNR.

Les éventuelles pertes économiques liées à l'emplacement perdu à cause de l'augmentation de l'emprise du stockage doivent également être prises en compte. Une révision du schéma d'exploitation peut compenser ces pertes.

2.6.3. Le coût des infrastructures d'avitaillement et aménagement

Le dimensionnement d'une station dépend principalement du plan d'exploitation de la flotte, de ses caractéristiques et des éventuels usages mutualisés. Par ailleurs, l'aménagement bord à voie d'eau et du poste d'accostage, constitue un coût non négligeable, pouvant varier de 90k€ à 300k€. Il est donc difficile d'estimer avec précision le coût de l'éventuelle station, qui reste très variable d'un projet à un autre.

La station bioGNC peut être mutualisée avec d'autres usages, notamment routiers. Cette possibilité a été envisagée notamment pour le projet « Pousseur Bélier », où une station AS 24 (TotalEnergies) existante se situait à une distance acceptable de la position d'avitaillement du bateau. Des travaux d'extension du réseau gaz (génie civil/ VRD/ tuyauterie et appareil de distribution gaz) ainsi que la création d'un poste d'accostage s'avéraient nécessaires. Le coût de tels travaux a été estimé sur ce projet à environ 500 000€ (200 000€ de travaux gaz/ raccordement depuis la station, 300 000€ pour le poste d'accostage).

De nombreux points restaient néanmoins en suspens dans le cadre de ce projet et n'ont pas été étudiés en détail : prise en compte des contraintes environnementales (crues, obstacles à la navigation, réglementation locale...), contractualisation pour l'achat des parcelles nécessaires, gestion de la sécurité entre les 2 sites, dispositifs de sécurité complémentaires dans le cadre d'une charge lente (la nuit) sans présence permanente de personnel.

Cependant, une autre contrainte émerge et n'est pas évoquée dans la bibliographie : l'impact de la consommation du bateau sur la disponibilité de la station à destination des véhicules routiers (débit réduit voire fermeture lorsque le bateau se remplit).

Tableau 16 : Coût des infrastructures de recharge

Capacité de recharge et aménagement	Investissement par station (k €HT)
Station de 40Nm ³ /h	Inférieur à 100k€
Station de 2x120 Nm ³ /h, sans stockage	250 k€– 280k€
Station de 2x120 Nm ³ /h, avec stockage (318kg)	330k – 380k€
Station de 1500 Nm ³ /h à 2000 Nm ³ /h	1,3M€ - 2M€
Poste d'accostage	90k€ - 300k€

2.6.4. Dispositifs de soutien au développement de la filière

Le développement de la filière bioGNC peut profiter des dispositifs d'aides pour financer en partie les études et les équipements.

Les deux dispositifs les plus connus sont le Plan d'aides à la modernisation et à l'innovation de la flotte (**PAMI**) et le dispositif **GATE** du programme CEE REMOVE.

Pour le PAMI 2023-2027¹⁶, deux volets principaux peuvent aider au financement :

- Le volet A : améliorer la performance environnementale de la flotte. Jusqu'à 60% du montant d'investissement, limité à 250 000€.
 → Ce volet concerne uniquement l'achat et l'installation des équipements lors de remotorisation en hybride électrique où la part électrique atteint 50%. **L'hybridation GNC-électrique est aujourd'hui éligible.** Les remotorisations en 100% bioGNC ne sont pour l'instant par reconnu en tant que systèmes de production d'énergie à faible émission.
- Le volet D : favoriser l'émergence des solutions innovantes. Jusqu'à 70% du montant des études, limité à 500 000€.
 → Ce volet concerne uniquement la réalisation d'études : projet de recherche fondamentale, industrielle, développement expérimentale et études de faisabilité. Les études de construction neuve et de remotorisation, en 100% bioGNC ou hybridation GNC-électrique sont éligibles. Les études de développement de moteur gaz marinisé et homologué sont également éligibles.

¹⁶<https://www.vnf.fr/vnf/accueil/beneficier-de-solutions-en-faveur-de-la-transition-energetique-du-secteur-fluvial/comment-financer-un-projet-de-verdissement-de-la-flotte-fluviale/>

Le dispositif GATE est quant à lui un dispositif basé sur les opérations standardisées des certificats d'économies d'énergie (CEE). GATE propose :

- En complément des aides du PAMI, de financer jusqu'à 90% des opérations de verdissement de flotte (**études et équipements**).
- La mise en relation avec des bureaux d'études en tant qu'assistant à maîtrise d'ouvrage (AMO) parmi une liste prédéfinie. L'AMO aura la charge de réaliser les études de dimensionnement du projet.

En complément de ces deux dispositifs, et en fonction du projet, d'autres dispositifs peuvent exister :

- Certaines Fiches d'Opération Standardisées, du dispositif CEE,
- Le fonds de dotation pour la décarbonation de la filière maritime française, lancé par CMA CGM et opéré par BPI France (200 M €),
- Le fonds d'intervention du maritime (FIM) créé en 2022 par la DGAMPA et reconduit en 2024 pour une dotation budgétaire d'environ 15 M €,
- Le fonds européen FEDER¹⁷,
- Des subventions régionales, pour les régions n'adhérant pas au PAMI.

Encadrer le prix du bioGNV pour réduire le risque de volatilité ?

La pertinence économique de la solution bioGNV pour le ferroviaire repose sur l'évolution des prix des carburants: estimée stable pour le bioGNV, et à la hausse pour le gazole, sur les 20 prochaines années.

Pour rappel, le biométhane est produit à partir de déchets organiques et injecté dans le réseau de gaz naturel. Le coût de production du biométhane est stable sur la durée de l'opération d'une installation de production. Or, le prix du GNV est aujourd'hui aligné sur les marchés européens du gaz / pétrole fossiles et auquel on ajoute le prix des garanties d'origine (GO) pour le BioGNV. La volatilité des cours du gaz rend le modèle économique d'une solution bioGNV très fragile et incertain, alors même qu'il s'agit d'une production locale décorrélée des conjonctures internationales.

Les acteurs de la filière ont évoqué qu'une décorrélation du prix du bioGNV à celui des autres énergies fossiles, et un blocage des prix sur quelques années, permettrait d'éviter de subir les augmentations conjoncturelles, telles que celles qui ont eu lieu ces 3 dernières années. L'exonération des droits d'accise a également été évoquée par les transporteurs comme un levier fiscal qui pourrait jouer en faveur du bioGNV. Il s'agit d'évolutions lourdes qui doivent être expertisées, mais traduisent le besoin d'une stabilité et d'une maîtrise des prix.

¹⁷ <https://www.europe-en-france.gouv.fr/fr/trouver-une-aide>

2.7. Application sur des cas d'usage

2.7.1. Le pousseur

Pousseur – construction neuve et remotorisation	
<p>Le système étudié est composé d'un pousseur et d'une barge utilisés pour le transport de marchandises. Afin de garantir la représentativité du cas d'usage, nous présenterons les résultats pour des barges de type EUROPA II, les plus courantes. Notre analyse se base sur l'étude de projets concrets [11], [20].</p> <p><u>Nous présenterons les résultats pour une navigation moyenne de 7h par jour.</u></p>	
	
<p>Dimensions : (pousseur / barge)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Longueur : 18 / 76,5 m • Largeur : 7,4 / 11,4 m 	<p>Contraintes de navigation :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Autonomie maximale (GNR / GNC / hybridation) : 7 / 3 / 4 jours • Vitesse moyenne : 12 km/h • Consommation : 50-70 kg/h • Profil de puissance appelée : constant
Dimensionnement	
Moteur hybride – construction neuve	100% bioGNC –remotorisation
<p>Architecture propulsive : hybridation GNC-électrique (autonomie augmentée)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Moteur/alternateur : 2x 350 kW en régime fixe, en format groupe électrogène • Batteries : 2x 50kWh - 240 kW 	<p>Architecture propulsive : 100% bioGNC Moteur : 2x 350 kW en régime variable</p>
<p>Capacité de stockage :</p> <ul style="list-style-type: none"> • bioGNC : 15m³ et 3,15 t pour 1 666L de bioGNC à 250 bars • Batteries : 2 batteries de 0,9m³ et 0,915 t pour 2x 50kWh 	<p>Capacité de stockage : bioGNC : 15m³ et 3,15 t pour 1 666L de bioGNC à 250 bars</p>

Spécificité d'aménagement :

Un pousseur n'est pas prévu pour transporter des marchandises à bord, mais pour pousser des barges qui, elles, en transportent. Le stockage des bouteilles de bioGNC peut donc être optimisé afin de garantir un bon équilibre hydrostatique tout en respectant les contraintes de sécurité et la réglementation. Dans notre cas d'usage, un conteneur de bouteilles peut être positionné à l'arrière de la timonerie du pousseur.

L'architecture motrice peut être positionnée dans la salle des machines, quant aux batteries, elles doivent être situées dans une salle avec portes étanches isolées des convertisseurs.

Spécificité du type de motorisation :

L'utilisation d'une motorisation hybride permet un fonctionnement tout électrique (entre 20 minutes et 40 minutes). De plus, l'utilisation de batteries, jouant le rôle de tampon, permet de préserver le groupe électrogène gaz avec une sollicitation constante, à régime fixe.

Une motorisation 100% GNC permet quant à elle de limiter les contraintes d'aménagement. De plus, le volume supplémentaire nécessaire au stockage des bouteilles de bioGNC reste inférieur à l'espace qui aurait été occupé pour le stockage de batteries.

Impact économique :

Pour l'analyse économique, nous décomposons la partie investissement (CAPEX) et exploitation (OPEX).

Pour les coûts d'exploitation, à partir des études regardées et des entretiens menés, nous considérerons l'assurance, l'équipage et les consommables hors carburant pour 181 000€ / an. À cela, s'ajoute le coût du carburant (GNR et bioGNC), suivant la courbe d'évolution des prix présentée dans la partie de l'analyse économique : le coût du moyen GNR serait multiplié par 2 à horizon 2030, tandis que la tendance du bioGNC ne serait que d'environ +5%. Notons que le renouvellement des batteries (dont la durée de vie est estimée à environ 10 ans) n'est pas pris en compte.

Sur une base de 2 000 heures de fonctionnement équivalent pleine puissance (HFEPP)/an de navigation, le surcoût du pousseur remotorisé en 100% bioGNC serait amorti au bout de 6 ans et celui d'un pousseur en hybride GNC-électrique, en construction neuve, serait amorti au bout de 7 à 8 ans.

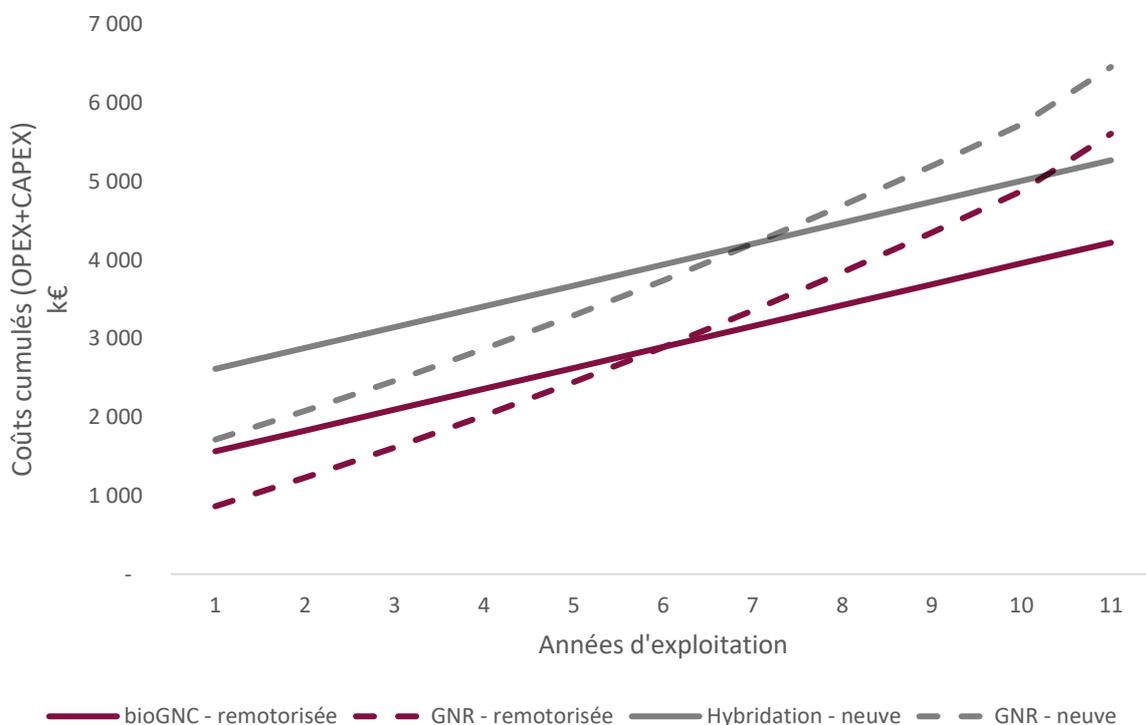


Figure 21 : Amortissement du coût bioGNC par rapport au GNR, sur 20 ans

Le coût CAPEX plus OPEX peut être compétitif, comparé à un pousseur GNR dans le cas d'un amortissement long entre 15 et 20 ans, que ce soit pour une construction neuve ou une remotorisation.

2.7.2. L'automoteur

Automoteur – remotorisation

Le bateau étudié est un automoteur, de type RHK (Rhein-Herne Kanal). Notre analyse se base sur l'étude de projets concrets [16], [19], [29].

Nous présenterons les résultats pour une longueur de 85 mètres avec une navigation de 9h par jour.



Les résultats seront présentés pour une architecture propulsive hybride bioGNC-électrique.

Dimensions :

- Longueur : 85 m
- Largeur : 7,5 m

Contraintes de navigation :

- Autonomie : 4 jours
- Consommation : 50-70 kg/h
- Vitesse moyenne : 10 km/h
- Profil de puissance appelée : constant

Dimensionnement

Architecture propulsive : hybridation GNC-électrique

- Moteur/alternateur : 2x 350 kW, en régime fixe, en format groupe électrogène
- Batteries : 4x 150 kWh -

Capacité de stockage :

- bioGNC : conteneur de 60 bouteilles de 205L soit 1,986 t de bioGNC à 200 bars
- Batteries : 4 batteries de 150 kWh pouvant être rechargées par 2 bornes de 22 kW

Spécificité d'aménagement :

Un automoteur présente un volume utile nécessaire aux contraintes métiers. L'aménagement de la motorisation et du stockage doit donc occuper un minimum de volume afin de ne pas impacter la cale de transport. Le moteur de propulsion GNR est remplacé par le moteur électrique de propulsion. Les batteries peuvent être positionnées dans les anciennes soutes à gasoil, à proximité du moteur de propulsion. Il est donc nécessaire d'agrandir la salle des machines afin d'y installer les groupes électrogènes gaz. Enfin, les bouteilles de bioGNC peuvent être placées sur une partie de la cale de transport (7m de long). L'installation des bouteilles dans la cale nécessite la création de ventilation.

Spécificité du type de motorisation :

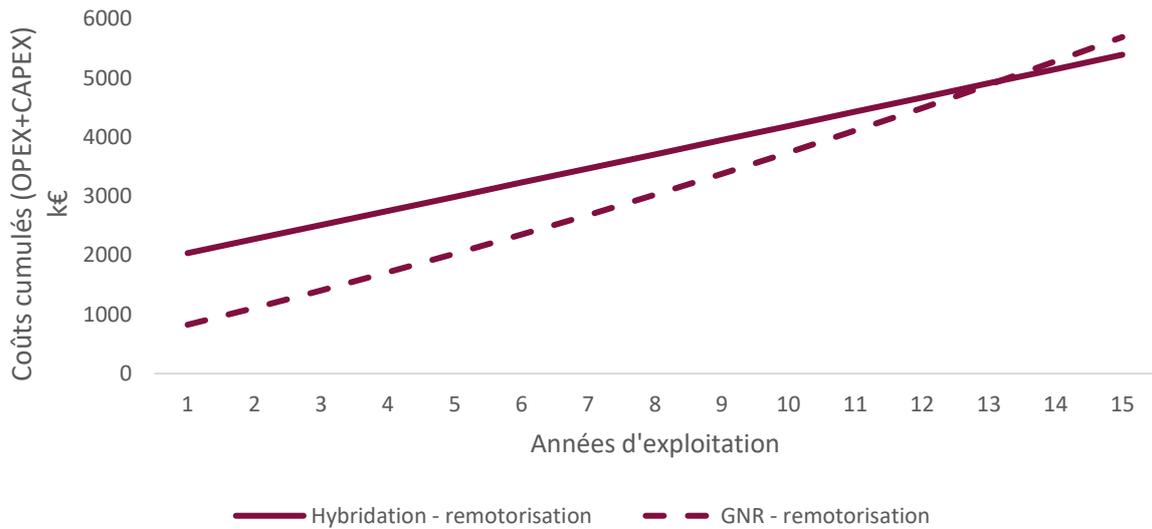
L'utilisation d'une motorisation hybride permet un fonctionnement tout électrique (entre 20 minutes et 40 minutes). De plus, l'utilisation de batteries, jouant le rôle de tampon, permet de préserver le groupe électrogène gaz avec une sollicitation constante, à régime fixe.

Une minimisation du parc de batteries est envisageable afin de maximiser le volume marchand ou de porter l'autonomie jusqu'à 6 voire 7 jours.

Impact économique :

Pour l'analyse économique, nous décomposons la partie investissement (CAPEX) et exploitation (OPEX).

Pour les coûts d'exploitation, à partir des études regardées et des entretiens menés, nous considérerons l'assurance, l'équipage et les consommables hors carburant pour 181 000€/an. A cela s'ajoute le coût du carburant (GNR et bioGNC), suivant la courbe d'évolution des prix présentée dans la partie de l'analyse économique : le coût du moyen GNR serait multiplié par 2 à horizon 2030, tandis que la tendance du bioGNC ne serait que d'environ +5%. Notons que le renouvellement des batteries (dont la durée de vie est estimée à environ 10 ans) n'est pas pris en compte.



Avec un surcoût d'investissement estimé à de 1 300 000€, le coût CAPEX plus OPEX peut être compétitif comparé à un automoteur GNR au bout de 13 ans.

2.7.3. Les bacs

Bac - remotorisation

Le bateau étudié est un bac à passages maritimes, type bac de Seine[25], [30]. Afin de permettre la représentativité du cas d'usage, nous présenterons les résultats pour un bac avec une amplitude horaire de 18h de travail par jour.

Les résultats seront présentés pour une architecture à propulsion gaz.



Les bacs étant des unités captives, il est plus aisé de proposer une propulsion au bioGNC ou en hybridation, vis-à-vis des contraintes d'avitaillement.

Que ce soit pour une propulsion en 100% bioGNC ou en hybridation GNC-électrique, de l'espace de transport de véhicule sur le point est perdu (léger, partiel voire total), au profit du stockage. Notre cas d'usage considère une perte légère, en hybridation GNC-électrique.

Dimensions :

- Longueur : 30-43 m
- Largeur : 8-10 m

Contraintes de navigation :

- Autonomie : 2 jours
- Consommation : 50-60 kg/h
- Profil de puissance appelée : Stop&Start

Dimensionnement

Architecture propulsive : hybridation GNC-électrique*

- Moteur/alternateur : 2x 490 kW, en régime fixe, en format groupe électrogène
- Batteries : les conclusions des études ne nous permettent pas de conclure sur un pack batterie adapté au profil énergétique d'exploitation.

Capacité de stockage :

GNC : 12 réservoirs cylindriques pour une capacité de 9600 L de bioGNC à 250 bars

**A noter qu'un bac fluvial s'expose à moins de résistance, et des trajets plus courts, que le bac maritime. Dans ce cas, le nombre de moteurs ainsi que leur puissance et les besoins de stockage peuvent grandement diminuer.*

Spécificité d'aménagement :

Un bac présente un volume utile nécessaire aux contraintes métiers. L'aménagement devra donc limiter au maximum le volume afin de ne pas fortement impacter la capacité de transport. Les batteries peuvent être positionnées en extérieur autour de la timonerie en hauteur afin de ne pas limiter la capacité de transport. Les réservoirs seront répartis sur le pont supérieur, afin de garantir l'équilibre hydrostatique.

Spécificité du type de motorisation :

Le bac étant un captif, il n'est pas nécessaire de disposer d'une autonomie très importante. Une autonomie de 2 jours permet de garantir le fonctionnement quotidien et prévenir 24H de délai d'intervention en cas de panne d'une des stations. Le mode d'avitaillement est à déterminer selon la proximité du réseau GNV permettant l'installation d'un compresseur fixe ou à défaut, d'un avitaillement mobile.

Impact économique :

Le manque d'étude précise sur le sujet ne nous permet pas de conclure sur l'impact économique. Ainsi, nous présentons une fourchette des coûts CAPEX de remotorisation.

- CAPEX remotorisation en gasoil (propulsion direct) : 650 000€ à 850 000€
- CAPEX remotorisation en hybride GNC-électrique (hors pack batterie) : 2 900 000€ à 3 900 000€

Le surcoût de l'investissement, par rapport à une motorisation Gasoil est de l'ordre de 2 000 000€ à 3 000 000€. À ce chiffre, le pack batterie doit être ajouté. Cependant, une étude détaillée des cycles d'exploitation de chaque bac est nécessaire.

2.8. Les impacts liés à la motorisation (bio)GNC en France

Sur la base de l'étude des cas d'usage, plusieurs limites et avantages du bioGNC ont été identifiés et sont communs à tous les bateaux.

Ils peuvent être regroupés selon les spécificités suivantes :

- Faible densité énergétique du bioGNC,
- Une architecture motrice encore en développement.

2.8.1. Impacts de la plus faible densité énergétique du bioGNC

Le bioGNC est caractérisé par une équivalence énergétique 3 à 4 fois plus volumineuses que le GNR du fait de sa plus faible densité énergétique et ses contraintes de stockage. Ce constat implique d'anticiper les freins lors des études de construction neuve ou de remotorisation.

Une réduction de l'**autonomie** des bateaux est à anticiper. Il est donc nécessaire d'optimiser le dimensionnement de l'architecture motrice en fonction des besoins réels du bateau. Ce constat s'applique également aux autres carburants dis « bas carbone ». Une architecture énergétique optimisée aux exigences spécifiques du trajet et de la charge peut compenser en partie la perte de densité énergétique du bioGNC, réduisant l'impact sur l'autonomie. Cette optimisation requiert une approche holistique, prenant en compte le cycle de navigation, le régime de vitesse, la voie d'eau, le volume utile.

Le cycle de navigation est dicté par les exigences spécifiques du métier. Une compréhension approfondie des distances à parcourir, des durées de trajet et des possibilités d'avitaillement permettrait d'identifier le besoin réel de l'unité.

Le régime de vitesse peut également être revu. La relation entre augmentation de vitesse et consommation de carburant étant exponentielle, le choix d'adapter l'architecture motrice à une vitesse moyenne inférieure permettrait de réduire grandement la consommation et d'augmenter l'autonomie. Par exemple, dans notre cas d'usage du pousseur naviguant sur un canal de type Seine, passer de 13 km/h à 12 km/h de moyenne permettrait de diviser quasiment par 2 la consommation de carburant. Il faut cependant veiller à ce que « les bateaux et convois atteignent une vitesse par rapport à l'eau de 13 km/h au moins. Cette condition n'est pas exigée des pousseurs naviguant haut-le-pied. » [31]

La voie d'eau est également un facteur influant sur la relation entre la puissance propulsive et la vitesse. La résistance hydrodynamique est déterminée par ses dimensions et son courant qui peuvent être variables selon le temps.

Enfin, le volume utile disponible est également impacté, du fait des besoins en volume de stockage plus important en bioGNC. Selon l'usage du bateau, le volume utile est directement lié aux objectifs métiers et a donc un lien prépondérant sur la rentabilité économique. Réduire le volume disponible pour le transport de marchandises entraîne une diminution du chiffre d'affaires par trajet, et dégrade donc potentiellement la rentabilité de l'opération.

2.8.2. Impacts liés à l'architecture motrice

L'adoption du bioGNC comme carburant principal pour les bateaux présente des impacts différents pour une solution 100% GNC ou pour une approche hybride.

Dans le cas d'une motorisation **100% GNC**, l'architecture motrice du bateau reste largement inchangée, permettant ainsi une transition simplifiée depuis des systèmes fonctionnant au GNR. Les modifications requises concernent principalement le système de stockage du carburant et de motorisation.

Une **solution hybride**, combinant bioGNC et électrique, s'inscrit dans une démarche de transition permettant de s'adapter aux évolutions réglementaires et de bénéficier du PAMI (ne finance actuellement que les équipements hybrides électriques). Dans le cas de construction neuve, une motorisation hybride permet d'anticiper une future rénovation vers une propulsion 100% électrique. Cependant, cela implique une conception plus complexe et un volume de stockage plus important, dû aux batteries.

Le coût et le temps de développement associé à un moteur GNC marinisé et homologué est relativement plus faible que pour les autres énergies de transition ou présentant de faibles émissions comme l'électrique ou le H2).

3. Les perspectives de déploiement du bioGNC dans la flotte fluviale et maritime côtière en France

Dans cette partie, l'étude cherche à identifier les zones de pertinence du bioGNC dans le transport fluvial et maritime côtier (typologies de bateaux et d'usages), le nombre d'unités qui pourraient être concernées ainsi que les volumes de biométhane associées. Ces résultats seront projetés dans trois scénarios, à l'horizon 2050, où se croisent nombreuses autres études et planifications. Par les études et données disponibles, seules les perspectives du transport fluvial ont été chiffrées. Les perspectives du bioGNC dans le maritime côtier ont été identifiées et mises en avant, sans être déclinées en scénarios chiffrés.

3.1. Perspectives du bioGNC dans le fluvial

3.1.1. La méthodologie en synthèse

Sur la base des entretiens réalisés et de l'analyse documentaire, la méthodologie se présente de la manière suivante :

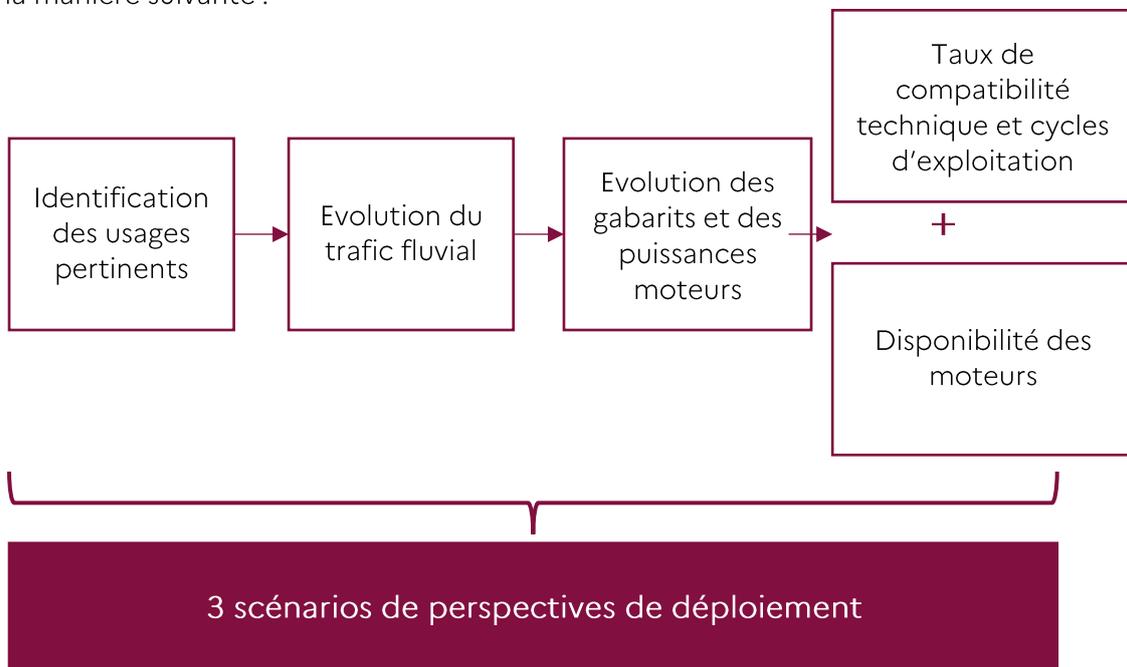


Figure 22 : Méthodologie employée pour les scénarios de perspectives de déploiement

En partant du postulat de l'évolution de la réglementation cadrant l'usage du bioGNC dans le fluvial (sans quoi, le bioGNC ne peut se développer), 3 scénarios ont été dressés.

Les 3 scénarios ont été bâtis sur la base de deux principaux filtres :

- **Filtre 1: La disponibilité de moteurs gaz « marinisés »** : traduit différents niveaux d'investissement de la part des motoristes pour le développement de moteur gaz adapté au transport fluvial,
- **Filtre 2: La compatibilité de la technologie GNC avec la filière fluviale** : traduit différents niveaux de comptabilité d'un moteur gaz en fonction du type de bateau, de son gabarit, de son usage et la capacité de l'exploitant à adapter son exploitation dans une certaine mesure.

Tableau 17 : Hypothèses structurantes de nos 3 scénarios

	Scénario "Prudent"	Scénario "Intermédiaire"	Scénario "Haut"
Evolution de la flotte française	Evolution trafic selon Tendancier ADEME (recalé en 2020)		Evolution trafic selon NAIADES III
	Hypothèses d'évolution des gabarits et des conditions d'exploitation (cf. Tableau détaillé)		
Règlementation	Evolution de l'ESTRIN cadrant l'usage de moteurs GNC dans le fluvial		
Filtre 1 : Disponibilité de moteurs GNC marinisés	3 moteurs	6 moteurs	Une gamme de moteurs adaptée aux puissances de tous les bateaux
	Constructeurs déjà approchés et ouverts à l'adaptation de moteurs gaz existants pour un usage fluvial	(moteurs gaz déjà existants, à adapter au fluvial)	
Filtre 2 : Compatibilité de la technologie GNC à la filière fluviale	Taux de compatibilité des bateaux actuels aux contraintes GNC (autonomie, intégration stockage, etc.)		
	Sans maillage de stations Stations locales Stations localisées au sein des sites rattachés à l'exploitation des bateaux, ainsi que d'éventuelles stations mutualisées. Stations dédiées principalement à des unités captives		Avec maillage dense Réseau de stations « publiques » déployées sur les principaux axes, permettant l'itinérance des unités fluviales

3.1.2. Construction des scénarios

3.1.2.1. Typologies de bateaux retenues

Sur la base de l'étude bibliographique et des différents entretiens menés, le **fret fluvial** est considéré comme l'usage fluvial principal pour le bioGNC. Nous considérons ainsi les typologies de bateaux suivants, pouvant transporter du vrac ou des containers :

- Les pousseurs,
- Les automoteurs.

Par manque de données, le transport de passager n'a pas pu être approfondi. Nous pouvons cependant le caractériser de la manière suivante :

- Une part importante de la consommation d'énergie de ces bateaux provient de l'utilisation des équipements auxiliaires, notamment en stationnement à quai. Cette consommation peut, entre autres, être couverte par un raccordement électrique direct via l'électrification des quais,
- De nombreuses unités fluviales pour passagers utilisent déjà des motorisations alternatives : GTL ou hybrides (facilitant ainsi la conversion vers du 100% électrique) ou 100% batterie,
- Les petites unités, comme les bateaux de promenade qui représentent 54% de la flotte en 2019[32], ont des besoins énergétiques limités et des trajets courts, ce qui rend la technologie des batteries plus adaptée à leur usage (ces bateaux peuvent être rechargés à quai entre chaque utilisation, confort passager amélioré, accès au ZFE),
- 70% des passagers sont transportés sur le réseau de canaux parisien[32], et cette filière se développe « de plus en plus dans d'autres villes fluviales de France telles que Strasbourg, Lyon, Toulouse, Bordeaux... ». Ces unités seront donc soumises, à terme, à des contraintes d'émission de type ZFE, poussant à l'emploi privilégié de motorisations électriques,
- Le secteur est encore à explorer des unités de grandes puissances et/ou parcourant de grandes distances.

3.1.2.2. Hypothèses d'évolution du trafic de fret fluvial et du nombre de bateaux

Nous prenons l'hypothèse que le trafic des pousseurs reste stable, sur la base des entretiens réalisés.

Nous faisons l'hypothèse d'une augmentation du trafic de fret via les automoteurs, par :

- Une évolution tendancielle des trafics de fret fluvial, conforme au scénario tendanciel ADEME Transition(s) 2050 - recalée sur les données de 2020. Cette hypothèse d'évolution du trafic a été appliquée aux scénarios "Prudent" et "Intermédiaire" ;
- Une évolution conforme aux objectifs NAIADES III de la commission Européenne, avec une croissance de +25% à 2030 et +50% à 2050 par rapport à 2020. Cette hypothèse d'évolution du trafic a été appliquée au scénario "Haut".

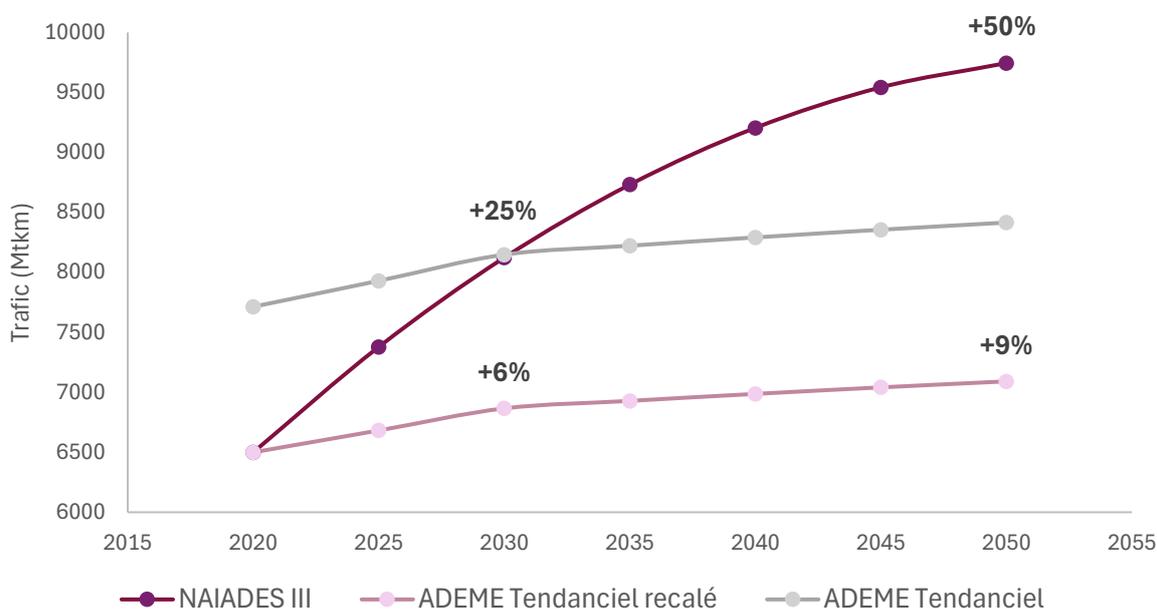


Figure 23 : Evolution du trafic de fret fluvial (Elcimai / éKinos)

3.1.2.3. Hypothèses d'évolution des gabarits de bateaux

Dans une étude publiée par VNF[33] en 2016, il est annoncé une forte augmentation des tonnages des gabarits des automoteurs qu'importe le scénario. Cette évolution est due exclusivement à l'ouverture du canal Seine Escaut, qui permet la navigation d'unité de fret fluvial de très grand gabarit. Ainsi, l'étude prévoit entre **+63 et +103%** d'augmentation de la capacité totale (automoteurs + barges) suivant les scénarios, dont 90% de la capacité rattachée au seul canal Seine Escaut, à horizon 2030. Pour qu'une telle augmentation de la capacité totale soit permise, l'augmentation des gabarits des automoteurs est nécessaire. **Ainsi, nous considérons dans nos scénarios, une augmentation de la proportion des automoteurs de forte capacité (Tonne de Port en Lourd supérieure à 1500T).**

Pour consolider cette hypothèse, les tendances récentes suivantes sont constatées par les acteurs de l'écosystème interrogés :

- Depuis 10 ans : une augmentation, faible mais régulière, de la part des automoteurs de TPL supérieur à 1500T.
- Une baisse progressive du nombre d'automoteurs de petite taille, ces derniers étant anciens pour la plupart, et ayant une rentabilité économique plus fragile que des unités à fort TPL.

Sur cette base, les hypothèses d'évolution des gabarits d'automoteurs suivantes ont été considérées :

- Proportion d'automoteurs de gros gabarit (TPL > 1500T) en 2040 : intermédiaire entre la proportion actuelle et celle envisagée par le scénario 1 de VNF (scénario le plus conservateur),
- Proportion d'automoteurs de gabarit moyen (TPL de 400T à 1500T) en augmentation du fait de la baisse de la proportion des petits gabarits.
- Proportion d'automoteurs de petit gabarit (TPL < 400T) : en 2040 : conforme au scénario 1 de VNF.
- Répartition des gabarits stable de 2040 à 2050,
- Un gain de 30% sur le TPL moyen des grands gabarits (>1500T) à 2040 puis stagnant à 2050. Aucune évolution sur les autres gabarits.

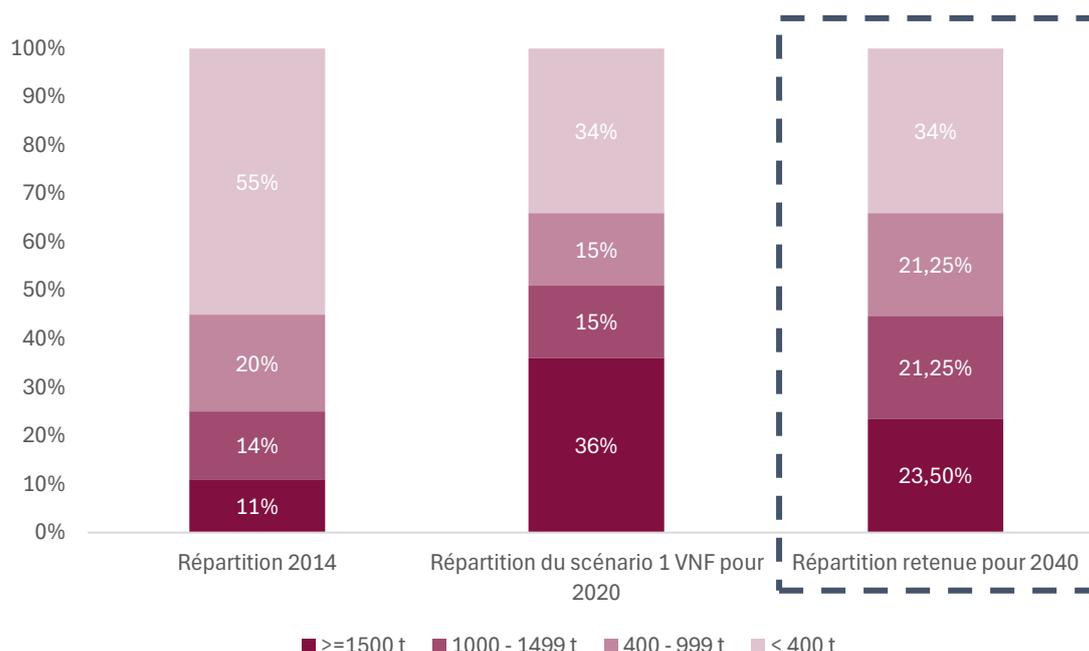


Figure 24 : Répartition des gabarits des automoteurs en fonction des scénarios de VNF (Elcimai / éKinos)

En ce qui concerne les pousseurs, ils ne sont pas étudiés dans l'étude réalisée par VNF[33]. Seules les barges associées aux pousseurs le sont. Néanmoins d'après les entretiens menés, il apparaît une tendance à la baisse de la proportion de pousseurs de forte puissance, ces derniers n'étant pas ou peu adaptés aux canaux français.

Pour la construction de nos scénarios relatifs aux pousseurs, il a donc été choisi de conserver une répartition unique, proche de la répartition actuelle, tout en diminuant la proportion de pousseurs de forte puissance.

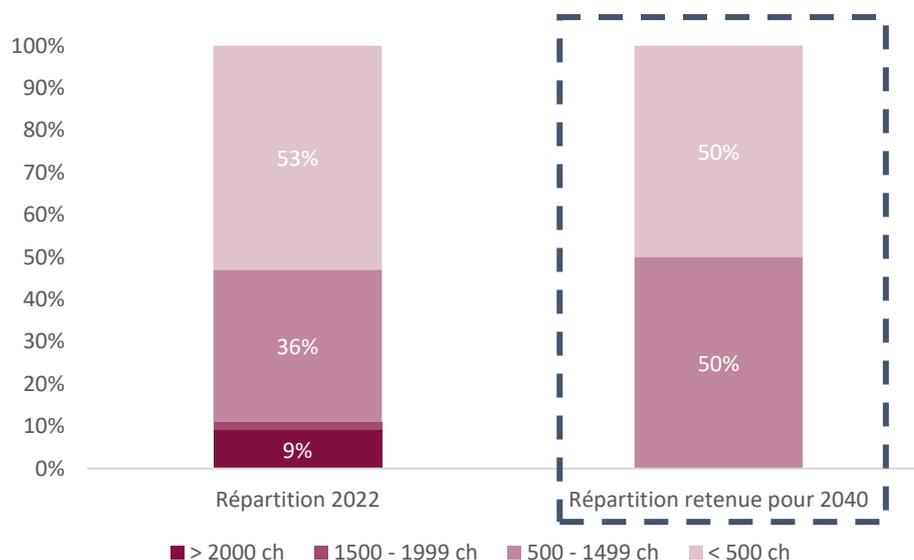


Figure 25 : Répartition des gabarits des pousseurs pour les deux scénarios (Elcimai / éKinos)

Les hypothèses complémentaires suivantes ont également été prises :

- Les données de trafic et les projections de leur évolution sont « tous pavillons confondus » : il y a environ 2/3 de bateaux français et 1/3 de bateaux internationaux,
- Les projections d'évolution de la flotte de bateaux français sont sur l'évolution globale du trafic, en prenant l'hypothèse d'une évolution homogène entre trafic de bateaux français et bateaux internationaux,
- Les distances moyennes annuelles parcourues restent identiques à celles constatées actuellement, pour chaque typologie de bateau (automoteur/ pousseur selon son TPL et sa puissance),
- Une augmentation des distances moyennes est néanmoins attendue, du fait de l'augmentation de la vitesse moyenne, due à des innovations sur le pilotage, l'automatisation d'écluses et l'ouverture du canal Seine-Escaut avec une faible quantité d'écluses. Cette augmentation est cependant difficilement quantifiable et n'a pas été considérée dans l'étude.

3.1.2.4. Résultat des projections d'évolution de la flotte de fret fluvial

Sur la base des hypothèses établies précédemment l'évolution des flottes d'automoteurs et de pousseurs peut être représentée ainsi :

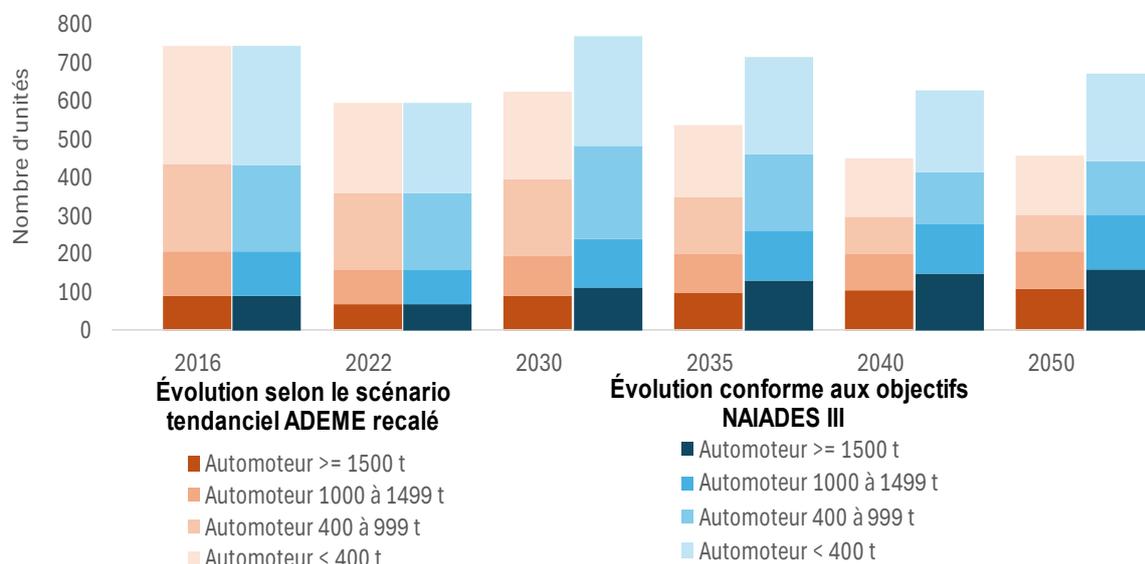


Figure 26 : Evolution des automoteurs entre 2016 et 2050 en fonction des scénarios (Elcimai / éKinos)

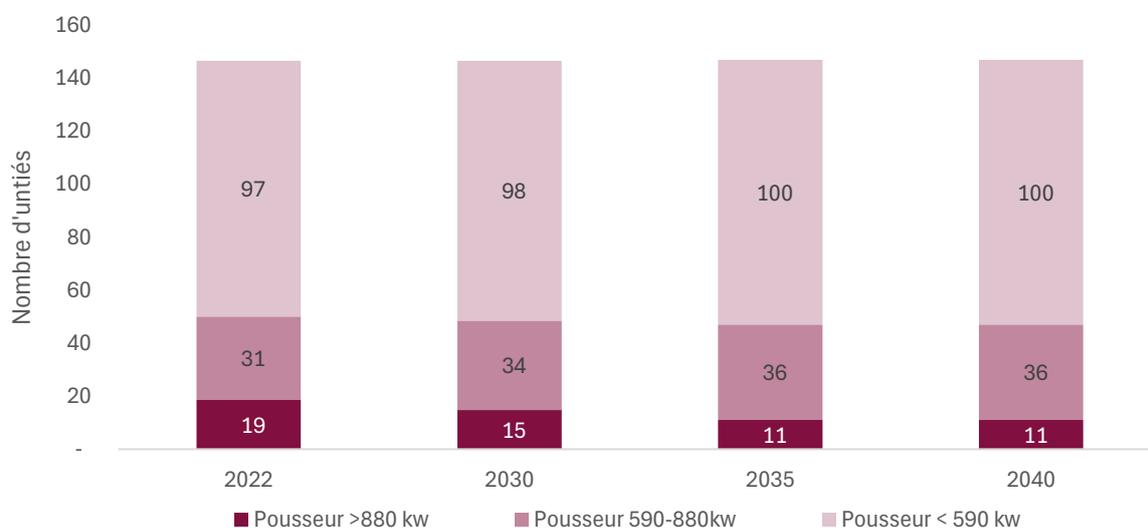


Figure 27 : Evolution de la flotte des pousseurs entre 2022 et 2050 (Elcimai / éKinos)

*À noter que l'évolution de la flotte des pousseurs n'est pas décliné dans nos scénarios.

3.1.2.5. Hypothèses relatives aux moteurs gaz

Les scénarios ont été bâtis sur la base des différentes hypothèses d'évolution de la flotte présentées précédemment, et de 2 filtres :

- **Filtre 1 :** La disponibilité de moteurs gaz « marinisés » (adaptés à la navigation fluviale)
- **Filtre 2 :** La compatibilité de la technologie GNC avec la filière fluviale et en fonction du type de bateau et de son gabarit.

Filtre 1 : disponibilité de moteurs GNC marinisés

Le filtre a été bâti en se basant sur :

- Un taux de renouvellement des moteurs en GNC :
 - 90% des bateaux ont renouvelé leurs moteurs en 20 ans (durée de vie moyenne des moteurs thermiques fluviaux)
 - En 2050, 90% des bateaux ayant une motorisation gaz à disposition en 2030 pourront potentiellement être renouvelés en motorisation GNC. Par exemple : *dans le scénario « Prudent », si en 2030, 10 automoteurs [1000 – 1500 t] ont une puissance totale comprise entre 400 et 500 kW, alors, 9 seront potentiellement renouvelés au GNC en 2050.*
- Des plages de puissances couvertes par les moteurs GNC disponibles :
 - Pour chaque scénario, des plages de puissances ont été définies (pour la construction neuve ou remotorisation) en fonction des moteurs disponibles en 2030 :
 - **Scénario « Prudent »** : 3 moteurs (92 kW, 230 kW, 478 kW)¹⁸
 - **Scénario « Intermédiaire »** : 6 moteurs (42,4kW, 60kW, 92kW, 230kW, 350kW, 478kW)
 - **Scénario « Haut »** : Une gamme de moteurs adaptée aux puissances de tous les bateaux
 - Les moteurs fonctionnent sur une plage allant de 75% à 100% de leur puissance nominale, en régime variable (plage de fonctionnement généralement admise sans dégradation significative du rendement) et en régime fixe (optimisation rendue possible par l'architecture hybride).
 - Chaque bateau est équipé de 1 ou 2 moteurs. Les bateaux équipés de plus de 2 moteurs représentant une part infime de la flotte et sont donc exclus.
 - Pour les scénarios « Prudent » et « Intermédiaire », il a été estimé que les armateurs ont aujourd'hui une puissance légèrement supérieure aux plages définies et seront en capacité d'adapter leurs modalités d'exploitation (vitesse/ accélération) pour utiliser un moteur GNC de plus faible puissance : jusqu'à -5% dans le scénario « Prudent » et -10% dans le scénario « Intermédiaire »
Par exemple, le moteur de 478 kW a une plage de fonctionnement entre 717 kW (2 moteurs x 478 kW x 75 %) et 956 kW (2 moteurs x 478 kW). Dans le scénario « Prudent », des bateaux ayant une motorisation d'origine de 1006 kW (956 kW / 95%) pourraient fonctionner avec ce moteur.

Filtre 2 : compatibilité de la technologie GNC à la filière

Un taux de compatibilité, selon le type de bateau et de gabarit a été estimé sur la base de l'analyse bibliographique et des entretiens.

¹⁸ Le moteur MAN ROLLO – E2862 495kW (GE) est lui déjà disponible.

Tableau 18 : Taux de compatibilité de la technologie GNC à la filière, par scénario

		Taux de compatibilité	
		Sans maillage de stations Stations locales	Avec un maillage de stations dense
		Scénarios « Prudent » et « Intermédiaire »	Scénario « Haut »
Automoteur	>= 1500 t	15%	20%
Automoteur	1000 à 1499 t	25%	35%
Automoteur	400 à 999 t	40%	50%
Automoteur	< 400 t	40%	50%
Pousseur	>880 kw	10%	15%
Pousseur	590-880kw	60%	70%
Pousseur	< 590 kw	60%	70%

Ce taux prend en compte les aspects suivants indépendamment de la création d'un réseau de stations :

- La compatibilité des cycles d'exploitation des unités fluviales en GNC

Exemple 1 : Un pousseur de ligne opère en itinérance sur de longues distances et nécessite une très grande autonomie que la motorisation GNC ne permet pas sans maillage de station.

Un maillage de stations d'avitaillement pourrait répondre à certains besoins – mais demeurer trop contraignant pour d'autres (stations GNC de très forte capacité, temps d'avitaillement trop long).

Exemple 2 : Un automoteur de faible capacité réalisant des missions de courte durée possède suffisamment d'autonomie en GNC pour s'avitailer une fois de retour à son site d'origine. En revanche en cas de mission plus longue, seul un maillage de stations lui permet de couvrir le nombre de jours d'autonomie requis.
- La compatibilité technico-économique pour installer ou non une motorisation GNC sur une unité fluviale

Exemple 1 : Les automoteurs de petite taille n'ont pas nécessairement l'espace pour accueillir tout le système de stockage + motorisation GNC, ou ces intégrations sont trop pénalisantes en termes de capacité résiduelle (impact économique). Ces contraintes peuvent en revanche être moindres en cas de de stations.

Exemple 2 : Les pousseurs disposent de ponts pouvant être dédiés en partie à l'accueil de stockage. La surface disponible peut tout de même être limitante en fonction de l'autonomie requise, et de la présence ou non de réseau de stations.

3.1.3. Résultats des scénarios

Le potentiel d'automoteurs et pousseurs qui seraient pertinents pour une motorisation GNC, selon les 3 scénarios, en nombre d'unités aux horizons 2030, 2035, 2040 et 2050 est présenté sur les graphiques ci-après.

Evolution de la flotte d'automoteurs au bioGNC selon les 3 scénarios

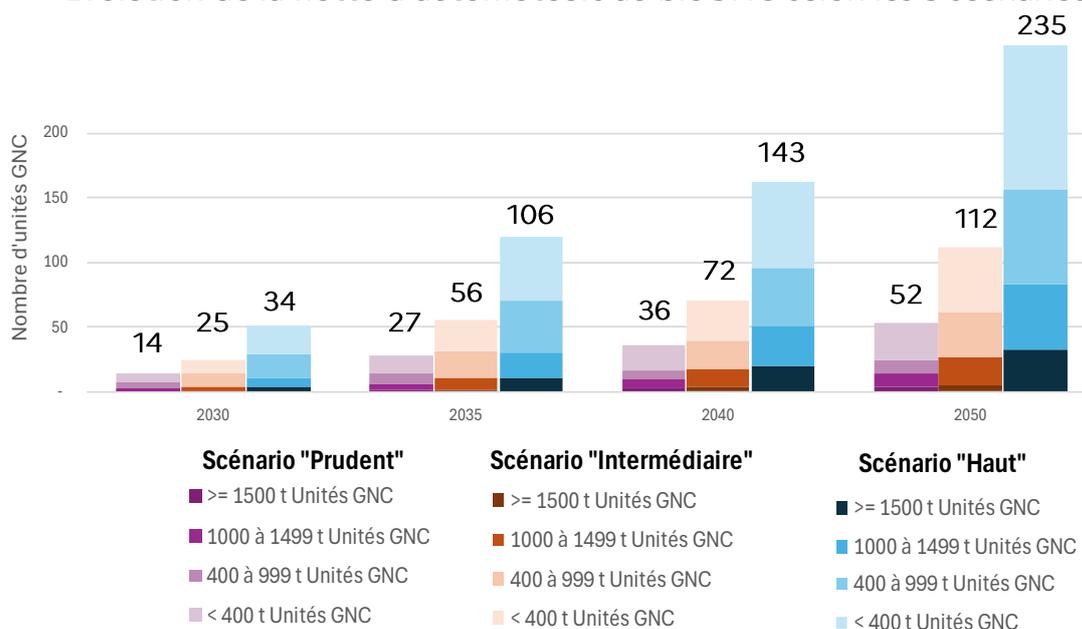


Figure 28 : Évolution de la flotte d'automoteurs selon les 3 scénarios (Elcimai / éKinos)

Evolution de la flotte des pousseurs au bioGNC selon les 3 scénarios

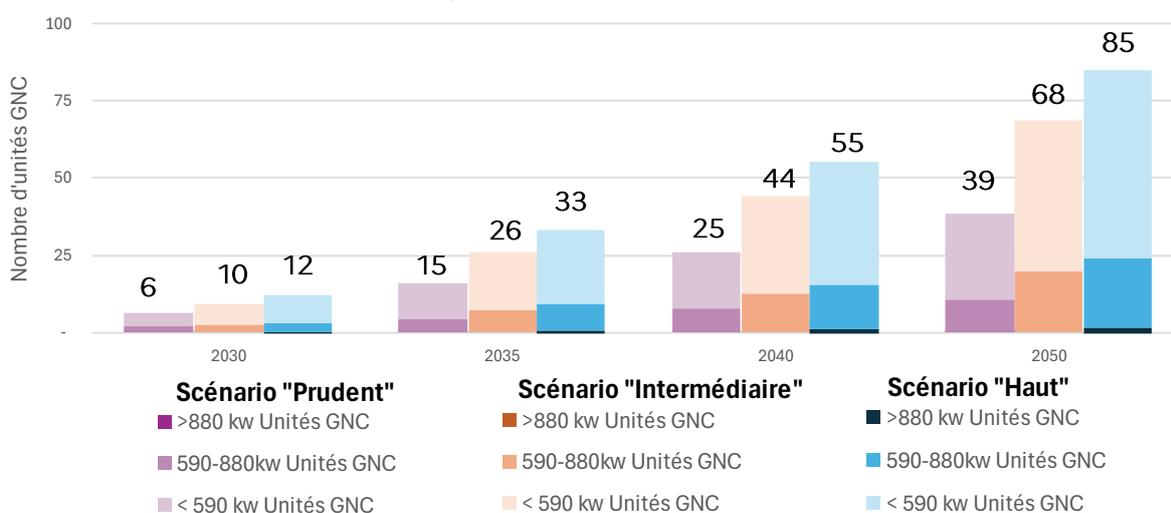


Figure 29 : Évolution de la flotte de pousseurs selon les 3 scénarios (Elcimai / éKinos)

Le potentiel de bateaux bioGNC pourrait ainsi représenter en 2050,

- De 12% à 35% de l'ensemble de la flotte des automoteurs (soit 53 automoteurs GNC sur 457 autmoteurs pour le scénario prudent à 12%, et 236 automoteurs GNC sur 672 automoteurs pour le scénario à 35%),
- De 26% à 58% de l'ensemble de la flotte des pousseurs (soit 39 pousseurs GNC sur 147 pousseurs pour le scénario prudent, et 85 pousseurs GNC sur 147 pousseurs pour le scénario haut).

3.1.4. Estimation de la consommation de biométhane dans le fret fluvial

La consommation correspondante à chacun des scénarios est évaluée à partir des consommations actuelles des différents types et gabarits de bateaux.

Ces consommations représenteraient pour l'ensemble du fret fluvial entre 58 et 256 GWh de biométhane en 2050 selon les scénarios.

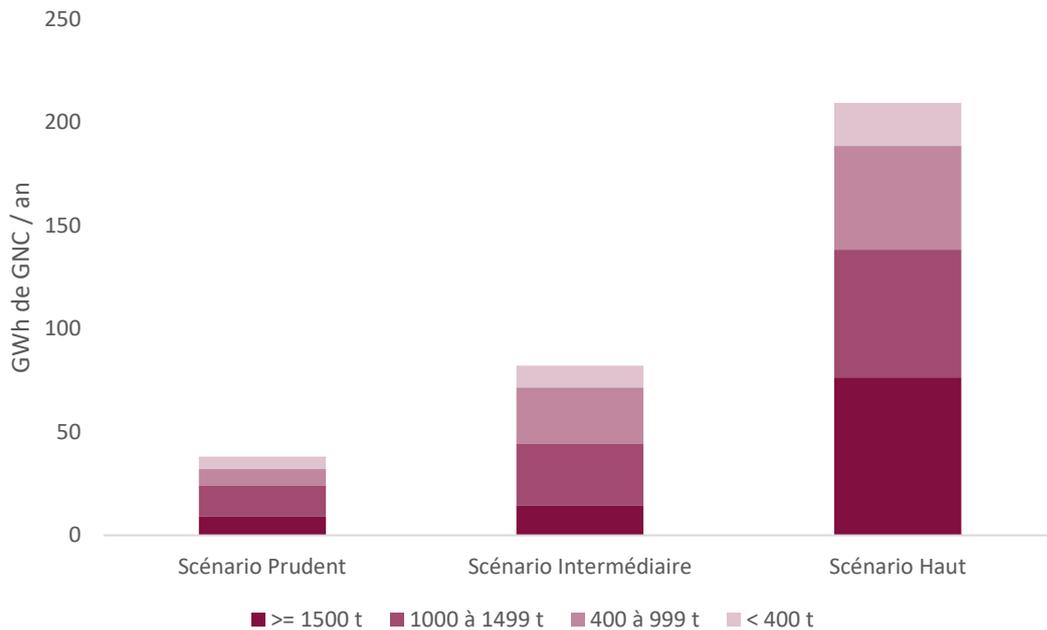


Figure 30 : Consommation annuelle potentielle de bioGNC des automoteurs en 2050 (Elcimai / éKinos)

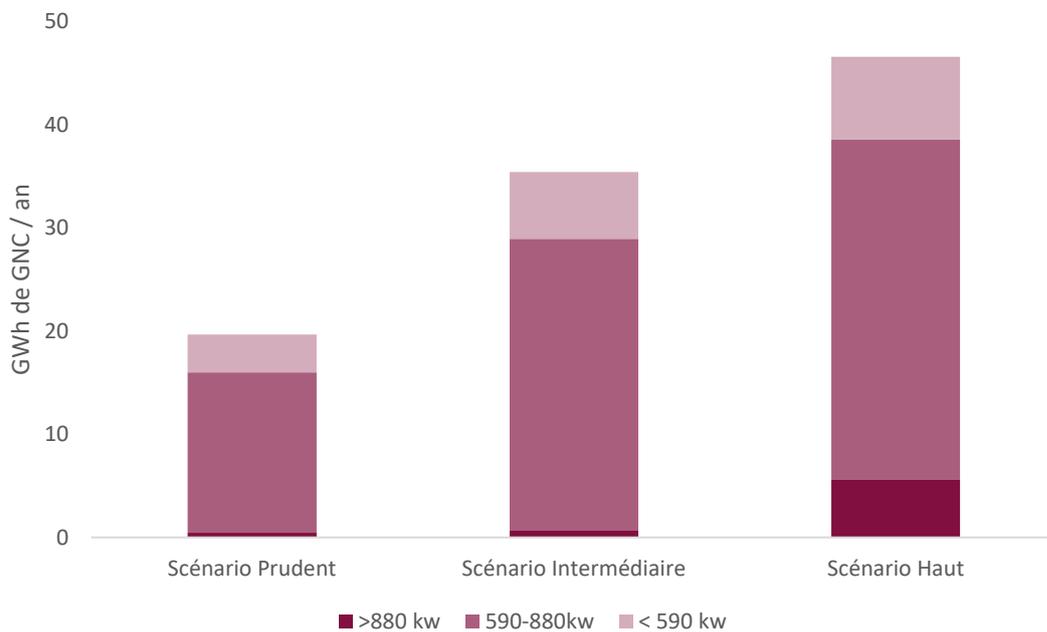


Figure 31 : Consommation annuelle potentielle de bioGNC des pousseurs en 2050 (Elcimai / éKinos)

On peut noter un très fort différentiel sur la consommation des automoteurs entre les scénarios « intermédiaire » et « haut », du fait :

- D'un nombre d'automoteurs plus faible en 2050 dans le scénario intermédiaire ;
- De bateaux de fort tonnage, non couverts par les 6 moteurs disponibles en scénario intermédiaire ;
- De très fortes différences de consommation annuelle selon les tonnages.

A noter par ailleurs que ces consommations sont volontairement maximisées, elles ne prennent pas en compte différentes pistes d'optimisation, à ce stade difficilement quantifiable, notamment :

- Gain d'efficacité des moteurs gaz (progrès technologiques) et optimisation de la conception (diminution de la puissance),
- Baisse de la consommation gaz en cas d'hybridation gaz / électrique,
- Optimisation des trajets (innovation sur le pilotage).

3.1.5. Mise en perspective avec le potentiel de production de biométhane

La consommation globale du fluvial à horizon 2050 selon les 3 scénarios est présentée dans le graphique ci-après.

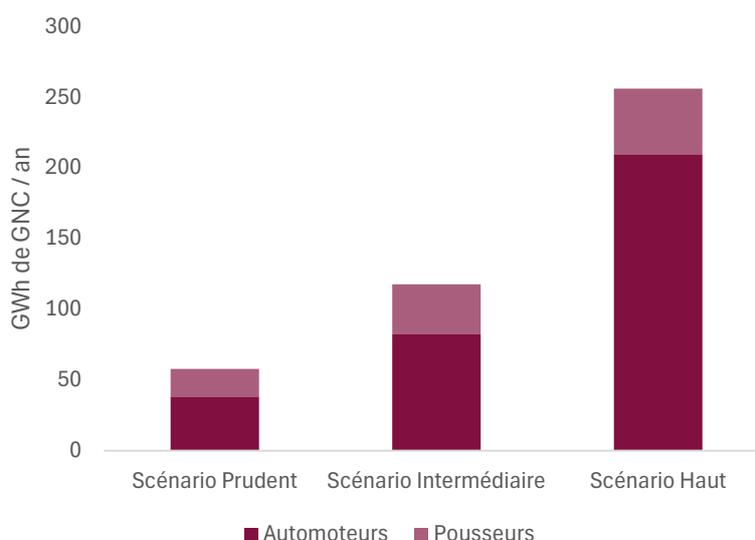


Figure 32 : Consommation annuelle potentielle de bioGNC du fret fluvial en 2050 (Elcimai / éKinos)

Dans les différents scénarios de décarbonation du mix gazier à horizon 2050 le potentiel de production de biométhane varie de 86 à 202 TWh, pour une moyenne de 132,7 TWh pour les 9 scénarios considérés (Négawatt, 4 Ademe + tendanciel, PPE/SNBC AMS et gaz haut, GRDF/GRTGaz territoire ajusté).

Aussi à 2050 les besoins en biométhane du fret fluvial représentent une part très mineure (de 0,04% à 0,19% selon les scénarios) du potentiel de production.

A noter que cette proportion est encore plus faible en prenant en compte les procédés moins matures de production de gaz bas carbone (gazéification, méthanation), permettant d'atteindre un mix gazier décarboné de 80 à 100% selon 7 des 9 scénarios considérés. Ces potentiels étant plus incertains ils n'ont pas été considérés dans le tableau ci-après.

Tableau 19 : Mise en perspective de la consommation en biométhane du fret fluvial avec le potentiel de production

Potentiel de production à 2050	Part de la consommation de biométhane par le fret fluvial à 2050		
	Scénario prudent	Scénario intermédiaire	Scénario haut
130 TWh	0,04%	0,09%	0,19%

3.2. Perspectives du BioGNC dans le maritime côtier

Le transport maritime côtier concerne les navires soumis à la réglementation internationale maritime (en aval de la limite des affaires maritimes) et qui naviguent dans la bande côtière intérieure de pêche, à savoir 6 à 12 milles marins. Les navires concernés sont :

- Les navires de liaison inter-îles et les bacs fluvio-maritimes (lorsqu'ils sont dans des zones estuariennes soumises à marées),
- Les navires de pêche,
- Les navires spécifiques incluant la surveillance des côtes, les navires de service (dragues, remorqueurs, caboteurs, ...) et les navires ou barges d'avitaillement (déchets, eau, marchandises, véhicules...).

Compte tenu du manque de données chiffrées, cette étude propose uniquement un avis qualitatif et sourcé, sur le potentiel de déploiement du bioGNC pour les navires maritimes côtiers. Des conclusions sont proposées plus spécifiquement pour les navires de pêche artisanale, notamment sur la base de l'étude PêGaz[9].

3.2.1. Passage d'eau et liaison inter-îles

Les navires de passage d'eau et liaison inter-îles et les bacs fluvio-maritimes sont des unités utilisées de manière intense en journée (nombreux allers-retours). Le Groupement des armateurs des services publics de passages d'eau (GASPE) compte aujourd'hui 18 adhérents pour une centaine d'unités fluvio-maritimes.¹⁹

Bien qu'il s'agisse de flottes captives facilitant l'avitaillement, les temps d'arrêt entre deux allers-retours sont trop courts, et l'avitaillement doit donc être effectué de nuit. Cette typologie de navires a un besoin de stockage important et une capacité de stockage à bord limitée (les unités transportant des passagers et des voitures). Néanmoins, les navires côtiers de transport de passagers qui n'embarquent pas de voitures sur le pont pourraient envisager une solution au bioGNC (propulsion à 100% bioGNC ou en hybridation GNC-électrique). C'est notamment le cas du navire **Amphytrite**[30], lauréat de l'appel à projet GRDF décarbonation du transport fluvial & maritime côtier 2023.

3.2.2. Navires de pêche côtière

D'après l'étude PêGaz[9] (étudiant principalement des profils d'exploitation de chalutiers), le bioGNC pourrait trouver une zone de pertinence sous certaines conditions (de taille et de profil d'exploitation). Les navires de pêche sont répartis en deux grandes familles :

- **Les arts dormants** : engins immobiles ou en dérive où les poissons viennent se piéger (Fileyeurs, ligneurs, palangriers, ...). Les arts dormants semblent plus adaptés[8]. Les arts dormants sont par leurs usages des unités de tailles plus petites (généralement inférieur à 15 mètres) laissant peu d'espace disponible pour le stockage de bioGNC, malgré des besoins énergétiques plus faibles.
- **Les arts trainants** : engins actifs où l'on « chasse » le poisson. Le manque de données d'exploitation pour les arts trainants (en particulier pour les fileyeurs et les ligneurs) ne permet pas de déterminer la pertinence du bioGNC pour les petites unités[8]. Les unités de petites tailles sont toutes exclues dans notre périmètre. Les arts trainants de grandes tailles mériteraient d'être étudiés en profondeur.

¹⁹ Données 2019 : <https://www.gaspe.fr/>

D'après les données par matricule, les navires composant la flotte française de pêche se répartissent dans les catégories suivantes :

Tableau 20 : Nombre de navires de la flotte française de pêche [9]

Types d'arts	Type de navire	Nombre
Arts trainants	Chalutiers	788
Arts trainants	Dragueurs	347
Arts dormants	Fileyeurs	1762
Arts dormants	Ligneurs	175
Arts dormants	Palangriers	469
Arts dormants	Caseyeurs	1359
Arts dormants	Senneurs	128
Autres		316

Sont exclus: les navires en DROM-COM et les navires de pêche hauturière de taille généralement supérieure à 24 mètres (et donc en dehors des réglementations relatives à la pêche côtière).

Nous ne pouvons donc pas exclure totalement les arts trainants. De plus, la capacité de la cale à poissons est fortement réduite, du fait de l'intégration du stockage bioGNC. Il paraît ainsi difficile de considérer des **navires de taille inférieure à 15m**, que sont principalement les arts dormants.

Le manque de données d'exploitation pour les arts trainants (en particulier pour les fileyeurs et les ligneurs) ne permet pas de définir des cas de pertinences pour les petites unités[9]. Ne pouvant conclure par manque de données sur les unités de petites tailles.

Pour résumer, un potentiel pourrait exister pour les types de navires et dans les conditions suivantes :

Tableau 21 : Navires de pêche considérés

Types d'arts	Type de navire	Considéré ?	Commentaire
Arts trainants	Chalutiers	Oui	Chalutiers supérieurs 20 mètres, effectuant des sorties en mer inférieurs à 3 jours ou fonctionnant en arts dormants.
Arts trainants	Dragueurs	Oui	Dragueurs supérieurs à 15 mètres
Arts dormants	Fileyeurs	Oui	91% des unités sont de petite taille (<15 mètres) rendant le stockage de bioGNC difficile, par rapport aux consommations types considérées. Unités supérieures à 15 mètres.
Arts dormants	Ligneurs Palangriers Caseyeurs Senneurs	Non	L'unité est de petite taille rendant le stockage de bioGNC très difficile, par rapport aux consommations types considérées

3.2.3. Navires spécifiques

Les navires spécifiques regroupent une grande famille de navires côtiers aux usages et caractéristiques très variés et adaptés aux besoins de chaque façade. Il serait nécessaire d'étudier, au cas par cas, la pertinence ou non du bioGNC pour les navires spécifiques. Étant donné le manque de données concernant cette flotte et l'incapacité à tirer une tendance générale pour cette famille, nous ne pouvons approfondir les usages pertinents pour les navires spécifiques, dans cette étude. Cependant, en caractérisant les navires spécifiques comme « flotte captive ou semi-captive », le bioGNC peut trouver sa place, (comme en témoigne la commande de l'Armateur Workboat, présentée dans la synthèse des projets).

3.2.4. Perspectives du bioGNC dans le maritime côtier : les limites de la bibliographie

L'état de la bibliographie ne nous permet pas d'en déduire de manière chiffrée les zones de pertinence pour l'utilisation du bioGNC pour le maritime côtier. En effet, les solutions au bioGNC sont encore méconnues et ne sont, de facto, que rarement envisagées dans le maritime côtier.

Notre étude qualitative des principales typologies de navire maritime côtier identifie toutefois la pertinence d'une solution bioGNC : pour les navires de pêches (de moyennes et grandes tailles avec un temps de sortie en mer inférieure à 72 heures) et les unités spécifiques (pour la plupart étant des flottes captives).

Afin d'approfondir, il est nécessaire d'avoir des données plus précises sur la flotte et de mener des études spécifiques complémentaires :

- **Données sur la flotte maritime côtière** : les données disponibles pour la flotte de navires côtiers manquent de précision. Afin d'aller plus loin, ces données devraient pouvoir suivre à minima le nombre de moteurs par unité et leur puissance respective. Les données exploitées[9] ne sont que parcellaires (puissance totale embarquée, puissance souvent surestimée, ...) et ne permettent pas de conclure,
- **Etudes spécifiques** Contrairement au secteur du transport fluvial, il n'existe pas suffisamment d'études sur des projets spécifiques dans le maritime côtier, ce qui rend difficile l'évaluation des besoins énergétiques réels et spécifiques de chaque type d'unité. En raison des conditions de navigation souvent plus exigeantes, il n'est pas possible de comparer directement ces besoins avec ceux du transport fluvial. Des études plus généralisées ou ciblées par secteur, comme l'étude PêGaz, pourraient apporter des informations supplémentaires et enrichir la réflexion sur ce sujet.

En ce qui concerne la version liquide (GNL) déjà cadrée réglementairement, le marché est déjà existant avec des moteurs disponibles, des équipages formés et expérimentés à l'exploitation et à la maintenance ainsi qu'un réseau d'avitaillement adapté et en développement. De plus, on constate, depuis l'intégration du GNL dans la réglementation européenne, un fort développement de ce combustible. Des acteurs intégrés tels que CMA CGM, cherchent à décarboner l'ensemble de la chaîne logistique et se positionnent sur cette solution.

4. Enjeux et recommandations

A partir de l'analyse bibliographique et des entretiens auprès des acteurs de la filière, 8 points d'attention ou problématiques ressortent :

- Le manque de connaissance du BioGNC par les acteurs,
- L'absence de cadre réglementaire dédié,
- L'autonomie et le stockage diminués,
- L'avitaillement,
- Le manque de moteurs biogaz marinisés,
- Le positionnement du bioGNC face aux autres carburants,
- La formation et les compétences de l'équipage,
- Le soutien politique et financier.

4.1. Pédagogie et communication

Si la solution d'une propulsion au GNC pour une construction neuve ou une remotorisation n'est pas étudiée systématiquement dans le transport fluvial et maritime côtier, au même titre que les autres solutions (électrification, hydrogène, biocarburants...), c'est en partie dû à un manque de connaissances des acteurs de la filière sur l'ensemble des composantes : l'impact environnemental, la sécurité, les études réalisées, les expérimentations ou encore les moteurs disponibles. Il n'existe actuellement que peu d'expérimentations et de démonstrateurs en France.

Par ailleurs, les entretiens ont mis en exergue des besoins de sensibilisation et de formation à deux niveaux :

- **Le dimensionnement des moteurs** : souvent surdimensionnés par rapport aux vitesses réelles d'exploitation, entraînant un surcoût important des moteurs, mais également une perte d'efficacité énergétique lors du fonctionnement sous-nominal et par conséquent un besoin d'emport en carburant plus important,
- **Les vitesses de navigation** : qui peuvent, pour certains usages, être réduites de 1 ou 2 km/h, permettant une économie importante de carburant – le rapport consommation / vitesse devenant exponentiel au-delà d'une certaine vitesse - les acteurs de la filière parlant même de « mur de consommation » - avec une autonomie supérieure à emport de carburant équivalent.

L'optimisation de ces 2 aspects aiderait fortement à une meilleure adoption de carburants alternatifs pour lesquels les problématiques d'autonomie sont de vrais freins (GNC, H2, électrique batterie).

Il semblerait également que de nombreux acteurs du secteur n'aient pas encore une vision claire des solutions à leur disposition pour mener leur transition énergétique. Ils disposent de peu d'informations factuelles pour comparer et étudier les solutions les plus adaptées à leurs besoins.

4.2. La réglementation

La fracture qui existe entre les acteurs du secteur et les régulateurs peut être observée de deux manières :

- D'un côté, les armateurs, les bureaux d'études, et les motoristes attendent un cadre réglementaire sécurisant avant de s'engager dans des projets de motorisations alternatives comme le bioGNC. Ils souhaitent avoir un cadre réglementaire qui garantit la viabilité, la sécurité et la conformité de leur projet. Cette difficulté est d'autant plus prégnante que les porteurs de projets (les armateurs) sont pour la plupart des entreprises de taille petite ou moyenne, qui ne peuvent se permettre de prendre les risques financiers et de planning d'un projet sans cadre réglementaire défini.

- D'un autre côté, les régulateurs (la DGAMPA, la DGITM, et le CESNI) semblent être en attente de démonstrateurs et de retours d'expérience pour élaborer des normes spécifiques et durables, plutôt que de créer des réglementations qui pourraient être inadaptées à la réalité du terrain, ou encore investir des ressources sur une filière qui ne prouve finalement pas sa viabilité économique ou sa pertinence technique.

Cette « attente » entre les deux parties souligne l'importance de la communication et de la collaboration entre les acteurs du secteur et les régulateurs.

La question réglementaire est également étroitement liée à la sécurité à bord. Les risques liés au gaz ont connus et maîtrisés depuis de nombreuses années dans d'autres secteurs (industriel, transport routier). La transposition dans le secteur fluvial doit permettre de fixer un cadre réglementaire adapté, accompagné de formations (notamment à destination du personnel navigant et des gestionnaires d'infrastructure) - mais ne semble pas poser de problème technique.

Quelle réglementation doit être créée et sur quoi devrait-elle se baser ? L'adaptation de la réglementation GNC existante dans les secteurs maritime ou routier ne semble pas être la solution, de part des différences techniques trop importantes, principalement dues aux différences de contraintes d'exploitation et de gabarit.

Les prescriptions réglementaires de l'ES-TRIN, propres au secteur du fluvial, se concentrent sur les normes de sécurité : l'installation des équipements, la surveillance, la maintenance mais également les procédures de réponse en cas d'accident. Afin d'alimenter les discussions autour du bioGNC pour la rédaction de l'ES-TRIN 2025, il est urgent de construire et valider un démonstrateur, sur lequel des premières conclusions puissent être tirées.

Les normes environnementales ont également un rôle à jouer afin de créer un cadre incitatif à l'émergence de projets de nouveaux carburants durables.

Les projets en cours permettront de tirer des conclusions à moyen terme (3-5 ans) sur les normes de sécurité et d'exploitation à intégrer dans les prescriptions de l'ES-TRIN.

4.3. La perte d'autonomie et le stockage

Avec une densité énergétique 3 à 4 fois inférieure au GNR, l'utilisation du bioGNC amène à questionner les habitudes d'exploitation. Dans les projets de remotorisation, afin de conserver une autonomie acceptable, le volume occupé par le stockage de carburant est augmenté de l'ordre de 20% à 40%, sans toutefois conserver l'autonomie initiale. Par ailleurs, le coût du stockage en bouteilles à haute pression est très important, sa limitation facilite également l'acceptabilité d'un point de vue économique.

Pour faciliter l'adoption du bioGNC, les sujets suivants doivent être considérés par les porteurs de projet afin de mesurer la compatibilité de leur projet et saisir les opportunités de choisir ce type de motorisation :

- La possibilité de s'avitailer plus fréquemment et/ou sur un temps plus long,
- La possibilité de profiter de la remotorisation ou du remplacement de bateau pour optimiser énergétiquement son architecture propulsive,
- La possibilité de revoir son fonctionnement (vitesse réduite, puissance de moteur plus faible, hybridation permettant une meilleure efficacité énergétique...) et réduire ainsi sa consommation et ses besoins en stockage,
- Eventuellement, la modification de l'équilibre du bateau, pouvant impacter sa stabilité,
- Eventuellement, l'équilibre économique du projet du fait de l'espace occupé à bord pour stocker du carburant à la place de marchandises ou passagers.

La solution bioGNC doit être comparée non seulement au GNR, mais aussi aux autres carburants alternatifs : biocarburants (XTL/ B100), méthanol, électrique batterie et hydrogène, chaque carburant ayant des avantages et des inconvénients.

L'étude de l'autonomie du bateau doit être réalisée au cas par cas, et optimisée dans le cadre d'un projet global incluant des réflexions sur la conception générale, l'architecture moteur et les modalités d'exploitation. Cette évaluation globale devra permettre de choisir le carburant le plus adaptée.

4.4.L'avitaillement

Contrairement aux carburants liquides conventionnels qui bénéficient d'un réseau d'avitaillement conséquent proche des fleuves, l'absence de stations GNC bord à quai constitue l'un des principaux freins à son développement. Plusieurs solutions ont été recensées dans les différents projets : construction de stations de petite taille afin de minimiser les coûts, livraison par camion-avitailleur, livraison par transfert de container ou encore extension de réseau de gaz depuis des stations GNC publiques existantes (à destination de véhicules routiers). Néanmoins, ces solutions se heurtent à des difficultés :

- Une offre de livraison à développer : certains fournisseurs sont déjà équipés pour l'avitaillement par camion notamment pour la sécurité lors du transbordement mais ne sont pour l'instant que peu nombreux et doivent s'adapter aux contraintes de navigations fluviales et maritimes,
- Le coût des stations GNC (300k€ à 1,5M€ selon le dimensionnement), plus élevé que les stations GNR/ Diesel (notamment en cas de station en charge « rapide » - similaire aux stations publiques routières),
- Le temps d'avitaillement plus long que le gazole, obligeant parfois à revoir les pratiques d'exploitation,
- Les contraintes de raccordement au réseau gaz, parfois trop distant pour que le raccordement soit soutenable économiquement.

En ce qui concerne la création de station bord à voie d'eau, la solution d'un utilisateur mono-acteur semble rarement soutenable économiquement – à moins de créer des stations de petite taille et d'accepter des durées très longues de charge. Les différentes études et entretiens tendent à s'accorder sur l'avantage de la mutualisation des usages (par exemple routier, fluvial, ferroviaire) au sein de stations de charge rapide, au niveau de « hubs », ou de sites industriels disposant de nombreux avantages (accès multi modaux, foncier disponible, réseau gaz, flux de véhicules déjà existants).

L'enjeu se trouve alors dans l'identification de la bonne parcelle bord à voie d'eau et au croisement des demandes en carburant d'autres acteurs. Sur l'axe Seine, c'est le travail qu'entreprend l'étude de schéma directeur AVICAFE[3].

Il est important d'aborder le sujet de l'avitaillement le plus tôt possible dans les projets. Par ailleurs il peut être difficile d'impliquer les énergéticiens (exploitants de stations GNC) pour la création de stations GNV ou l'extension depuis des stations existantes, les consommations (et donc l'intérêt économique) à court terme restant faibles. Il apparaît donc primordial de réaliser des études de faisabilité dédiées à l'avitaillement (avec des bureaux d'études spécialisés) en incluant toutes les problématiques associées à la réalisation d'une station d'avitaillement : raccordement gaz, sécurisation du foncier (notamment vis-à-vis de VNF ou d'un propriétaire privé), réglementation (ATEX, ICPE) et autres démarches administratives, dimensionnement des installations, études de flux et infrastructures associées (voiries, quais, voies ferrées...).

L'étude de modalités d'approvisionnement mobiles (avitaillement par camion et transfert de container), – est à développer car elles permettraient de limiter les investissements et apporter de la flexibilité également d'aider à l'amorçage de la filière BioGNC.

4.5. La disponibilité de moteurs gaz marinisés et homologués

Un moteur marinisé et homologué au GNC de MAN ROLLO de 495 kW (GE) est déjà disponible sur étagère et prêt à l'emploi que ce soit pour le transport fluvial ou maritime côtier.

Le développement d'autres gammes de puissances et typologies de moteurs marinisés et homologués est nécessaire au développement du bioGNC dans les filières maritimes et fluviales, afin de limiter les coûts associés à la marinisation et le temps de validation et pour le maintien de l'homologation de la base moteur, après les changements techniques.

Actuellement en discussion, la fixation d'un cadre réglementaire stable autour du bioGNC devrait faciliter l'émergence de nouveaux moteurs marinisés et homologués.

La réalisation d'études techniques précises, sur la marinisation et l'homologation de moteurs gaz permettrait également aux motoristes de faciliter la recherche et le développement et d'éclairer les acteurs, accélérant ainsi le développement de la filière.

4.6. La formation de l'équipage

L'enjeu de la formation et de la compétence est essentiel pour garantir la pénétration au marché d'une nouvelle technologie. In fine, les armateurs s'orienteront également vers les technologies que maîtrisent leurs équipages.

Aujourd'hui, des formations qualifiantes existent autour du bioGNV, comprimé ou liquéfié, que ce soit dans les autres secteurs ou dans ceux du fluvial et maritime.

4.7. Le soutien politique et financier

Il existe aujourd'hui, à l'échelle régionale, nationale et européenne, des aides pour le financement d'études et de remotorisation, tel que le PAMI par VNF ou le dispositif GATE du programme REMOVE. Cependant, ces aides ne financent pas tous les projets de construction neuve ou de remotorisation en bioGNC. Le PAMI par exemple ne finance actuellement que les remotorisations en hybride GNC-électrique.

Certaines filières énergétiques bénéficient d'un soutien politique plus marqué sous la forme d'appels à projets, de communication et de programmes. Elles sont également davantage mises en avant en Europe, comme le souligne l'étude CCNR qui ne mentionne pas le gaz naturel comprimé, ce qui pourrait expliquer une implication du pouvoir réglementaire moins prononcée dans ce domaine. Des discussions sont en cours afin de considérer le biométhane comme un carburant à faibles émissions de gaz à effet de serre.

L'encouragement à l'innovation, déjà mis en place notamment avec les appels à projets dédiés, incite les projets de recherche et de développement autour des nouveaux carburants.

4.8. Les recommandations pour relever les enjeux

Afin de répondre à ces enjeux et au regard des éléments apportés dans ce rapport, les recommandations suivantes peuvent être formulées :

- **Faire évoluer le cadre réglementaire :**
 - Cadrer, dans l'ES-Trin, les prescriptions techniques à l'utilisation de bioGNC.
 - Cadrer, par la DGAMPA, l'utilisation du bioGNC dans la filière maritime côtière.
- **Améliorer et partager la connaissance du bioGNC entre les acteurs de la filière :**
 - S'assurer de la présence de la solution du bioGNC dans les feuilles de route de décarbonation du fluvial avec la DGITM et du maritime avec la DGAMPA (France Mer 2030).
 - Continuer l'initiative des appels à projet qui soutiennent la recherche et l'innovation et l'accompagnement des porteurs de projet. Les résultats des constructions et remotorisations d'unité au bioGNC ou en hybride GNC-électrique seront un vrai levier auprès des armateurs et motoristes.
 - Produire un cahier des charges, à partir des conclusions de l'étude lancée en 2024 par l'ADEME, sur la description des changements techniques à opérer sur les moteurs lors de la marinisation.
 - Actualiser les cahiers VNF à destination des bateliers sur les combustibles bioGNC à l'image des autres combustibles alternatifs.
- **Généraliser les dispositifs d'aides publiques, sur le 100% bioGNC par exemple :**
 - Reconnaître le biométhane comme carburant bas carbone au niveau des fonds d'aides Européen, afin d'étendre les aides déjà disponibles (PAMI, Fonds FEDER, GATE, ...).
- **Mettre en place des solutions d'avitaillement agiles, et un maillage progressif de stations :**
 - Aider à l'émergence de solutions d'avitaillement alternatives (camion avitailleur, transfert de container) permettant d'aider à l'émergence d'une filière BioGNC d'ici à l'apparition d'un maillage de stations suffisant.
 - Mettre en place des stations d'avitaillement mutualisées avec les autres acteurs du territoire afin de trouver une rentabilité économique pour les stations en répondant aux besoins actuels, tout en préparant la conversion d'une partie de la flotte à l'usage partielle ou totale du bioGNC. Attention tout de même, le foncier pertinent pour placer ces stations d'avitaillement sont sous tensions et doivent être repéré rapidement. C'est notamment le travail entamé par VNF dans le cadre de son étude sur la Seine[3]

5. Annexes

Des formations d'intervention, diagnostic et réparation de véhicule GNV existent, orientées initialement pour des véhicules sur route.

Ces formations concernent bateau au gaz naturel mais également les installations d'avitaillement.

Nous distinguons 2 niveaux d'habilitation à intervenir :

- **Diagnostic** : être en capacité d'évaluer les problèmes et risques afin de se mettre en sécurité,
- **Réparation** : être en capacité d'intervenir, sans risque, sur le problème identifié.

Pour les habilitations employeurs, l'INRS détaille trois niveaux de qualifications :

Niveau de qualification	Intervention autorisée
1	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilisation à la sécurité • Notion de sécurisation de la zone de travail • Entretien d'un véhicule GNV • Circuit basse pression
2	<ul style="list-style-type: none"> • Niveau de qualification 1 • Circuit basse pression • Circuit haute pression sauf démontage/remontage de la vanne de réservoir.
3	<ul style="list-style-type: none"> • Niveau de qualification 2 • Intégralité du système GNV

Nom de la formation	Niveau d'intervention	Type de formation	Organisme formateur
BTS Maintenance des véhicules Option B Véhicules Industriels	Diagnostic et réparation	Formation initiale	Lycées professionnels / Centre de formation d'apprentis
CQP Technicien Expert Après Vente Véhicules Utilitaires et Industriels	<ul style="list-style-type: none"> • Echelon 9 : Diagnostic • Echelon 12 : Diagnostic et réparation 	Formation continue	Centre de formation d'apprentis / Organismes privés de formations
Formation GNV : Module de base	Formation non qualifiante	Habilitation employeur 3 heures	Organismes privés de formations (Groupe VTE : Maintenance & Conseils Industriels)

Intervention sur le circuit GNC basse pression	Niveau 1 INRS	Habilitation employeur 4 heures	Organismes privés de formations (Groupe VTE : Maintenance & Conseils Industriels)
Intervention sur le circuit GNC haute et basse pression	Niveau 2 INRS	Habilitation employeur 7 heures	Organismes privés de formations (Groupe VTE : Maintenance & Conseils Industriels)
Caractéristiques du Gaz naturel et consigne de sécurité	Niveau 1 INRS	Habilitation employeur 4 heures	Organismes privés de formations (Swagelok)
Notion de bases sur l'installation des raccords à tube	Niveau 2 INRS	Habilitation employeur 2 jours	Organismes privés de formations (Swagelok)
Intervention sur le réservoir Haute Pression et ses équipements	Niveau 3 INRS	Habilitation employeur 3 jours	Organismes privés de formations (Swagelok)
Formation intervention ATEX	Diagnostic et réparation	Habilitation employeur 2 jours	Organismes privés de formations (Bureau Véritas, Energyformation)
Les fondamentaux d'un projet de station d'avitaillement GNV	Diagnostic	Habilitation employeur 2 jours	Organismes privés de formations (Energyformation)
Exploitation d'une station GNC	Diagnostic et maintenance	Habilitation employeur 3 jours	Organismes privés de formations (Energyformation)

Entretiens acteurs des filières fluviales et maritimes – matrice AFOM

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> • Infrastructure de gaz bien développée en France • Motorisation gaz éprouvée dans le secteur routier • Transport fluvial en France adapté au GNC du fait des trajets plutôt courts et récurrents des bateaux • Les autres secteurs maîtrisent mieux le GNC, techniquement et réglementairement. Les équivalences, pour tous les points techniques et de sécurités sont donc possibles. • Les questions de sécurité sont faciles à répondre et dépendent beaucoup du mode de stockage en bouteille à bord. Finalement, bien moins dangereux que l'H2. • Motorisation hybride moteur électrique avec batterie et générateur biogaz offre une (très) bonne durée de vie des équipements (>30 ans pour le moteur, >15 ans pour les génératrices). • Il s'agit également d'un bon compromis économique entre le tout gaz et le tout électrique sur batterie. • L'hybridation permet de fonctionner en tout électrique (temporairement) si besoin, pour traverser les ZFE urbaines par exemple. • A long terme, l'hybridation peut évoluer en tout électrique. • Un cout par rapport au H2/ électrique avantageux si l'usage est repensé (pour diminuer la taille du stockage) • Augmentation de l'indépendance nationale et la souveraineté énergétique vis-à-vis des carburants et de la mobilité. 	<ul style="list-style-type: none"> • Densité énergétique très faible induisant une perte, au choix, d'autonomie ou d'espace. Une modification de l'exploitation semble souvent nécessaire • Problème d'encombrement pour faire tenir les unités de propulsion et stockage dans les unités fluviales • Besoin de compétence pour opérer les propulsions gaz. Les équipages ne sont actuellement pas formés • La question de l'avitaillement (où, comment, à quelle fréquence) est difficile à répondre • Le temps d'avitaillement estimé avec les stations poids lourds, est bien plus long qu'en GNR, malgré une pression autorisée de 250 bars • De manière générale, les nouvelles solutions sont très chères • Peu / pas de moteur Stage V gaz marinisé existant • Les armateurs sont en quête de standard sur leurs bateaux afin de garder une valeur monétaire en cas de revente du bateau. Ils évitent des solutions trop localisées / limitées à un seul de bassin de navigation • Finalement peu de bateau concerné, donc peu d'intérêt pour les motoristes à faire homologuer une gamme de moteur marinisé • Peu / pas de disponibilité actuelle de moteurs gaz marinisé et homologué • Le cout des stations (et consommation faible au début) avec maillage réseau gaz parfois insuffisant • L'intégration du stockage posant des difficultés : surcout, limite en autonomie, problèmes de stabilité et augmentation taille navire (surtout pour la pêche/ seuils réglementaires)
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> • Formations existantes côté maritime • Motorisation GNC existe dans le routier, • Réglementation GNL existante • Envisager l'avitaillement en remplaçant des racks des bouteilles vides par des racks de bouteilles pleines • Le protocole de remotorisation pour une motorisation hybride électrique / gaz a été défini avec la remotorisation du Sydney • L'utilisation partagée des stations est à terme une vraie possibilité. Des réflexions doivent être menées sur l'emplacement de la station, permettant à la fois un accès route pour les poids lourds et une approche par voie d'eau pour les bateaux. • Une réflexion est à mener quant à l'utilisation partagée de la station entre plusieurs acteurs (fluviaux, routiers et industriel) avec des niveaux de pression différents. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se confronte aux mêmes problèmes de sécurité que l'hydrogène (liée au stockage comprimée) • La réglementation n'est pas définie, les acteurs ont besoin d'un cadre pour avancer • Les questions d'infrastructure et de temps d'avitaillement sont primordiales mais souvent considéré à la marge dans un projet. • Les moteurs routiers GNC envisagés seront plus sollicités dans la navigation fluviale que le sont sur route, risque de casse • Les coûts d'homologations et de certification sont élevés, entre 700k€ et 2.5M€ pour une seule gamme de moteur pour un motoriste • Le soutage et l'avitaillement ne sont pas à négliger. Des stations existent mais les structures partagées doivent s'intensifier pour envisager le BioGNC comme une vraie solution.

<ul style="list-style-type: none">• Lors d'une remotorisation, mutualisation des coûts d'homologation en connaissant l'ensemble du parc moteur• Contraintes réglementaires accélérant la transition: ZFE, taxe carbone• Une limite en ressources pour les biocarburants, en compétition avec les autres secteurs	<ul style="list-style-type: none">• Aucune compétence gaz dans l'écosystème (et déclinante en diesel). Sans montée en compétence, risque de mauvaise image avec des problèmes de SAV/ fiabilité
--	---

Références bibliographiques

- [1] ADEME, « Base carbone : bioGNV pour véhicule routier ». 2023.
- [2] SER, Gaz et Territoires, GRDF, GRgaz, et Teréga, « Panorama des gaz renouvelables ». 2023.
- [3] VNF, « AVICAFE ».
- [4] 2C., « Sourcing de moteurs GNV pour le marché du fluvial ». 2023.
- [5] VNF, « Synthèse FLUENT ». 2022.
- [6] VNF, « Rapport final FLUENT ». 2022.
- [7] ADEME, « Impact air & climat transport fluvial ». 2023.
- [8] Acanor, « APS BioGNC pour navire de pêche ». 2022.
- [9] ACANOR, France Pêche Durable, et 2C., « PêGaz : définition d'un cahier technique pour un navire de pêche au bioGNC ». 2024.
- [10] SEGULA, « GreenDeliRiver : technical report ». 2022.
- [11] SEGULA, « Rapport d'étude : Pousseur GNC ». 2020.
- [12] SEGULA, « GreenDeliRiver : COPIL présentation ». 2022.
- [13] SEGULA, « Guide dérogation ES-TRIN ». 2019.
- [14] ShipST, « Rapport étude de faisabilité propulsion GNC 1 ». 2022.
- [15] ShipST, « Rapport étude de faisabilité propulsion GNC ». 2022.
- [16] ShipST, « SLOP ». 2023.
- [17] C. durable, « Les coûts environnementaux du transport maritime ». 2022.
- [18] M. transports, « Engagements pour la croissance verte du secteur fluvial ». 2019.
- [19] SEGULA, « APS hybride batterie-BioGNV remotorisation Andromeda ». 2021.
- [20] ShipST, « Plan pousseur ». 2022.
- [21] CESNI, « Standard européen pour la navigation intérieure ES-QIN ». 2019.
- [22] 2C., « Analyse étude énergétique pour le passage à une motorisation décarbonée ». 2022.
- [23] R. Heinberg et D. Fridley, « Un futur renouvelable - Tracer les contours de la transition énergétique ». 2019.
- [24] VNF, « Note sur la consommation des bateaux fluviaux et leur estimation ». 2014.
- [25] 2C., « Restitution de l'étude de conversion des bacs de Seine au BioGNV ». 2022.
- [26] E2F, « RA 2021 ». 2021.
- [27] ADEME, « Scénarios Transitions 2050 ». 2021.
- [28] BIP Europe, « Insights into the current cost of biométhane production. From real industry data ». 2023.
- [29] SEGULA, « APS hybride batterie-BioGNV remotorisation Du Grand Pavois ». 2021.
- [30] EXID Concept & Developpement, « Amphytrite - Navette côtière de transport de passager ». 2023.
- [31] CESNI, « ES-TRIN 2023 ». 2023.
- [32] E2F, « Chiffres clés de la filière 2021 ». 2022.
- [33] VNF, « Perspective pour la flotte de commerce 2030 ». 2016.
- [34] ADEME, « Rapport efficacité transport fluvial ». 2019.
- [35] ADEME, « Synthèse efficacité transport fluvial ». 2019.
- [36] ECNI, « Impact environnemental du nautisme ». 2009.
- [37] ATEE, « Rouler au bioGNV routier ». 2015.
- [38] CCNR, « Synthèse : Feuille de route fluvial ». 2021.
- [39] CCNR, « Rapport : Feuille de route fluvial ». 2022.
- [40] CCNR, « Résolutions adoptées ». 2022.
- [41] CCNR, « Synthèse étude comparative motorisation fluvial ». 2021.
- [42] VNF, « Colloque versissement flotte fluviale ». 2019.
- [43] ADEME, « BioGNV agricole et territorial ». 2022.
- [44] BATELIA, « Cahier technique : Propulsion gaz pour bateaux fluviaux ». 2020.
- [45] BATELIA, « Cahier technique : Propulsion H2 pour bateaux fluviaux ». 2020.
- [46] DGAMPA, « Division 222 ». 2018.
- [47] C. DUMORTIER, « AMELIORATION DE LA PERFORMANCE ENERGETIQUE DES BATEAUX CIVILS ET MILITAIRES ». 2020.
- [48] T. H. E. S. H. I. F. T. PROJECT, « Assurer le fret dans un monde fini ». 2022.
- [49] BATELIA, « Cahier technique : Propulsion hybride pour bateaux fluviaux ». 2018.
- [50] SEA-LNG, « LNG-Delivering decarbonisation ». 2023.
- [51] ISEMAR, « Le transport fluvial : une solution logistique d'avenir ? ». 2019.
- [52] Gaz de France, « Maritime Perspectives des carburants alternatifs maritime ». 2022.
- [53] F. H2, « Ecosystèmes portuaires et H2 ». 2021.
- [54] CONEX NAV, « Optimisation accostage des bacs sur les cales ». 2018.
- [55] GRDF, « Formations équipage ». 2022.
- [56] GRDF, « Groupe pilote : transition écologique de la flotte parisienne ». 2021.
- [57] CCNR, « Recommandation bateau SYDNEY BioGNC ». 2022.

- [58] Ministère de l'écologie, « Procédures de dérogations aux prescriptions techniques ». 2021.
- [59] CCNR, « Règlement relatif au personnel de la navigation sur le Rhin ». 2019.
- [60] France Pêche Durable, « COTEC BioGNC Navire de pêche ». 2022.
- [61] SEGULA, « Solution hybride batterie-BioGNV Andromeda ». 2021.
- [62] Norlink, « Efficacité énergétique motorisation fluviale ». 2022.
- [63] 2C., « Analyse étude énergétique motorisation décarbonnée HDF ». 2022.
- [64] Norlink, « Association Bateau et carburant ». 2022.
- [65] Norlink, « Remarques sur livrables diagnostic énergétique ». 2022.
- [66] « Livre blanc nouvelle motorisation et energie ». 2023.
- [67] SEGULA, « Rapport d'étude : remotorisation hybride Grand Pavois ». 2021.
- [68] Parlement Européen, « RÈGLEMENT (UE) 2023/1805 ». 2023.
- [69] VNF, « Prévision flotte ». 2030.
- [70] VNF, « Etat des lieux flotte septembre 2015 ». 2015.

Index des tableaux et figures

TABLEAUX

Tableau 1 : Carburants évoqués dans cette étude (ADEME 2023)	9
Tableau 2 : Principaux documents utilisés dans l'étude	20
Tableau 3 : Synthèse des bateaux et projets de bateau en bioGNC.....	25
Tableau 4 : Synthèse des avantages et inconvénients de différents carburants alternatifs (ADEME[7]).....	34
Tableau 5 : Nomes d'émissions de niveau V pour les moteurs de bateaux de navigation intérieure (IWP et IWA).....	37
Tableau 6 : Nomes d'émissions de niveau V pour les moteurs de bateaux de navigation intérieure (NRE).....	37
Tableau 8 : Rubrique ICPE 1413.....	41
Tableau 9 : Implantation possible du stockage.....	54
Tableau 10 : Avantages et inconvénients des différentes implantations du stockage.....	54
Tableau 11 : Scénarios des prix du baril de Pétrole entre 2020 et 2050 (Scénarios Transitions 2050 - ADEME).....	59
Tableau 12 : Scénarios des prix de biométhane entre 2020 et 2050 (Scénarios Transitions 2050 - ADEME).....	60
Tableau 13 : Coûts des études spécifiques au bioGNC	62
Tableau 14 : Coûts des équipements spécifiques au bioGNC	63
Tableau 15 : Synthèse des coûts spécifiques au bioGNC.....	64
Tableau 16 : Coût des infrastructures de recharge.....	65
Tableau 17 : Hypothèses structurantes de nos 3 scénarios.....	74
Tableau 18 : Taux de compatibilité de la technologie GNC à la filière, par scénario.....	80
Tableau 19 : Mise en perspective de la consommation en biométhane du fret fluvial avec le potentiel de production	83
Tableau 20 : Nombre de navires de la flotte française de pêche [9].....	85
Tableau 21 : Navires de pêche considérés	86

FIGURES

Figure 1 : Eléments techniques et non techniques considérés dans l'étude	9
Figure 2 : Interactions des acteurs de l'écosystème fluvial et maritime côtier (Elcimaiï).....	11
Figure 3 : Chaîne de valeur de la production de biogaz et biométhane (infographie Sia Partners).....	17
(1) STEP: Station d'Épuration des eaux usées. (2) ISDND: Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux. (3) PSA: Pressure Swing Absorption. (4) En France, le modèle de l'injection est prédominant par rapport à la valorisation directe hors réseaux	17
Figure 4 : Détails des acteurs – Entretiens réalisés	22
Figure 5 : synthèse des composantes considérées et non considérées dans les études regardées.....	30
Figure 6 : Articulation entre la directive EU et l'ES-TRIN	38
Figure 7 : Calendrier provisoire pour les travaux réglementaires (CESNI – mars 2023).....	39
Tableau 7 : Rubrique ICPE 4310	41
Figure 8 : Schéma des distances à respecter pour les installations de compression et stockage de gaz naturel (source: S3D).....	42
Figure 9 : Représentation graphique de l'architecture propulsive 100% GNC (Batelia, Lebéfaude Solutions Navales).....	44
Figure 11 : Représentation de l'architecture hybride parallèle.....	46
Figure 12 : Synoptique de la marinisation et l'homologation	48
Figure 13 : Synoptique d'une station d'avitaillement GNC.....	50
Figure 14 : Schéma d'avitaillement avec une station fille.....	51
Figure 15 : Camion avitailleur muni d'un container de stockage, et d'un container de « transfert » incluant un compresseur.....	52
Figure 16: densité énergétique des carburants[23].....	56
Figure 17 : Consommation de carburant (GNR) par rapport à la vitesse[24].....	57
Figure 18 : Modèle retenu d'évolution du prix du GNR.....	59
Figure 19 : Modèle d'évolution du prix du biométhane retenu	60
Figure 20 : Modèle retenu d'évolution du prix du GNR et du bioGNC	61
Figure 21 : Amortissement du coût bioGNC par rapport au GNR, sur 20 ans	68
Figure 22 : Méthodologie employée pour les scénarios de perspectives de déploiement	73
Figure 23 : Evolution du trafic de fret fluvial (Elcimaiï / éKinos)	75
Figure 24 : Répartition des gabarits des automoteurs en fonction des scénarios de VNF (Elcimaiï / éKinos).....	76
Figure 25 : Répartition des gabarits des pousseurs pour les deux scénarios (Elcimaiï / éKinos).....	77
Figure 26 : Evolution des automoteurs entre 2016 et 2050 en fonction des scénarios (Elcimaiï / éKinos).....	78
Figure 27 : Evolution de la flotte des pousseurs entre 2022 et 2050 (Elcimaiï / éKinos).....	78
Figure 28 : Évolution de la flotte d'automoteurs selon les 3 scénarios (Elcimaiï / éKinos).....	81
Figure 29 : Évolution de la flotte de pousseurs selon les 3 scénarios (Elcimaiï / éKinos).....	81
Figure 30 : Consommation annuelle potentielle de bioGNC des automoteurs en 2050 (Elcimaiï / éKinos).....	82
Figure 31 : Consommation annuelle potentielle de bioGNC des pousseurs en 2050 (Elcimaiï / éKinos).....	82
Figure 32 : Consommation annuelle potentielle de bioGNC du fret fluvial en 2050 (Elcimaiï / éKinos).....	83

Sigles et acronymes

ACV	Analyse de Cycle de Vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
ADR	Accord for Dangerous goods by Road
AFBE	Association Française du Bateau Electrique
AMO	Assistant à Maîtrise d'Ouvrage
ATEX	ATmosphère EXplosive
CEE	Certificat d'Économie d'Énergie
DGPR	Direction Générale de la Prévention des Risques
EMNR	Engin Mobile Non Routier
GNC	Gaz Naturel Comprimé
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
GNV	Gaz Naturel pour Véhicules
ICPE	Installation classée pour la protection de l'environnement
PAMI	Plan d'Aides à la Modernisation et à l'Innovation de la flotte
RPM	Règlement pour le transport et la manutention des marchandises dangereuses dans les Ports Maritimes
RPP	Règlement Particulier de Police
TPL	Tonne de Port en Lourd

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



POTENTIEL DU BIOGNC DANS LA NAVIGATION FLUVIALE ET MARITIME COTIERE

Cette étude, menée conjointement par l'ADEME et GRDF, et avec la participation de VNF, évalue les perspectives de déploiement du bioGNC dans le transport fluvial et maritime côtier. L'étude repose sur une revue bibliographique, des entretiens auprès des acteurs de l'écosystème, et des études de cas spécifiques.

Le bioGNC présente un potentiel de déploiement non négligeable pour le transport fluvial : il pourrait concerner 12% à 40% de la flotte d'automoteurs et de pousseurs.