



ÉTUDE DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT «FLUENT»

**LES ÉLÉMENTS DE LA FEUILLE DE ROUTE
NATIONALE POUR LE VERDISSEMENT DU
SECTEUR FLUVIAL**

INTRODUCTION

VNF a élaboré les éléments de la feuille de route française pour le verdissement du secteur fluvial avec l'IFP Energies Nouvelles, (établissement public reconnu pour son expertise indépendante à caractère industrielle et scientifique) et en partenariat avec le Ministère de la transition écologique (DGITM), l'ADEME, l'Europe, la CNR et E2F.

Baptisée FLUENT (pour FLUvial ENERGIE Transition), cette étude de recherche et développement à méthodologie holistique et innovante s'inscrit dans un contexte où la Commission Européenne et la CCNR (Commission Centrale de la Navigation du Rhin) et l'État français avec les ECV (Engagements pour la Croissance Verte) préparent pour le secteur fluvial, une trajectoire avec une série de mesures visant à réduire significativement et en deux temps le niveau des émissions de polluants et de gaz à effet de serre (GES) :

- **2035** : les accords de Mannheim objectivent une réduction de 35 % par rapport à 2015, et la fin autant que possible des émissions de gaz à effet de serre et d'autres polluants d'ici 2050.
- **2050** : la Commission Européenne vise l'objectif de la neutralité carbone dans le cadre du «Pacte vert pour l'Europe».

Pour relever ce défi, le secteur fluvial s'est organisé à l'initiative de VNF et a mis en place des solutions techniques innovantes qui répondront aux futures mesures environnementales.

De plus, VNF a porté la maîtrise d'ouvrage de FLUENT car **seule une étude menée avec une méthodologie croisant modélisations énergétiques, environnementales et économiques à partir de cas réels d'usages de bateaux permet de construire des modèles complets et ainsi de projeter durablement le verdissement de la flotte.**

Il a donc fallu étudier :

- les différentes solutions de propulsions des bateaux : le périmètre des technologies de propulsion étudiées couvre les applications « thermiques » conventionnelles, différentes architectures d'hybridation ainsi que le tout électrique alimenté par batterie ou par pile à combustibles (PAC);
- et les différents vecteurs énergétiques à utiliser : le GNR, les biocarburants (B100 et HVO) et les carburants de synthèse dont le BTL, le biogaz, l'hydrogène, le biométhane et l'électricité.

Sur le seul bassin Rhône Saône, plus de 250 modélisations énergétiques ont ainsi été réalisées. **Environ cinquante modèles significatifs ont été retenus et ont fait l'objet d'une analyse complète du cycle de vie (ACV) du puits à l'échappement et du berceau à la tombe pour les composants du groupe motopropulseurs (GMP). Une évaluation technico économique (TCO : coût total de possession) sera également réalisée.**

Pour mémoire, les besoins moyens annuels en France, sans projection d'augmentation de trafic, du secteur fluvial pour réaliser sa transition sont évalués à 120 000 Nm³ de GNR = 1 TWh par an (estimation).



LES MODÉLISATIONS ÉNERGÉTIQUES

Les modélisations énergétiques sont déclinées sur 5 familles de bateaux significatives : «automoteur», «pousseur de ligne», «pousseur urbain», «promenade» et «paquebot fluvial» sur le seul bassin Rhône Saône.

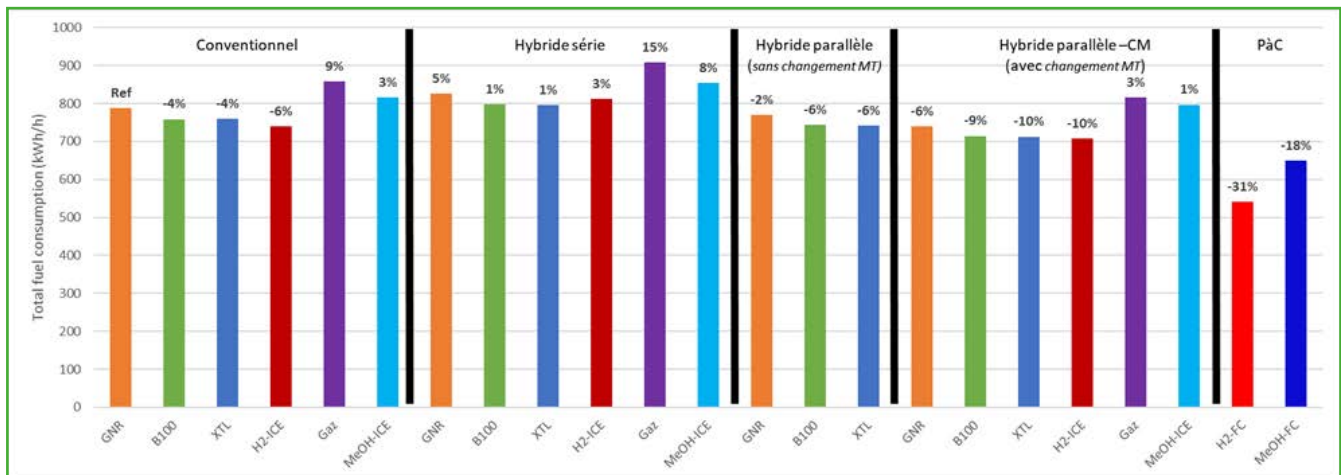
Pour chacune de ces familles, un cycle représentatif moyen du profil énergétique des bateaux a été établi notamment sur la base de l'étude PROMOVAN afin de rendre compte statistiquement de la sollicitation énergétique de ceux-ci.

La modélisation énergétique, réalisée à partir des profils obtenus de l'ensemble des solutions de propulsion, a été effectuée avec le logiciel Simcenter Amesim™ software co-édité par Siemens et l'IFPEN sous forme d'une « simulation système ».

Ce logiciel permet de calculer et comparer selon la même méthodologie les dépenses énergétiques des bateaux, en s'appuyant sur des hypothèses énergétiques des propulsions des bateaux qui peuvent être projetées sur des horizons 2035 et 2050.

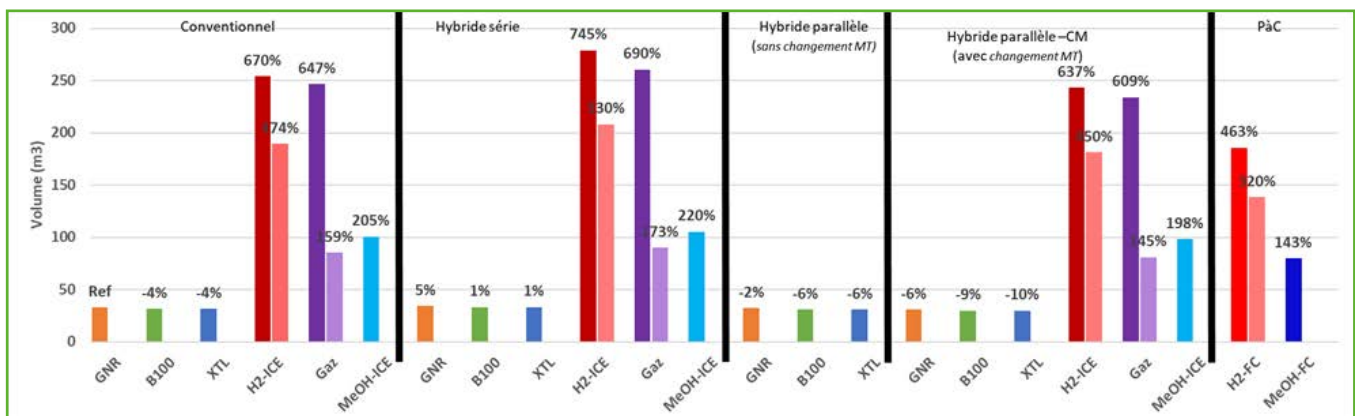
Une estimation des émissions massiques de polluants locaux (NOx, HC, CO et particules) sur un AVC complet a également été obtenue sur la base de facteurs d'émissions collectés dans la littérature propre au secteur fluvial.

Les résultats énergétiques mettent en évidence la sobriété énergétique des solutions électrifiées, en particulier l'utilisation des batteries de la pile à combustible à l'hydrogène vert ou au biométhane qui présente un meilleur rendement l'énergétique et l'avantage de ne pas émettre de polluants locaux en sortie d'échappement.



Consommations énergétiques pour l'automoteur à l'horizon actuel :
Les résultats sont rapportés en kWh/h afin de permettre la comparaison des différents vecteurs.

Cependant, les volumes de carburant nécessaires pour assurer la même autonomie que le GNR (réservoir de référence établi à 33 m³), peuvent être jusqu'à 8,4 fois plus volumineux que le stockage de référence GNR. Ainsi dans le cas d'une pile à combustible, bien que possédant des meilleurs rendements que les motorisations diesel, les volumes nécessaires pour son fonctionnement, sur une même mission donnée, sont de 2 à 4 fois supérieurs.



Volumes de carburant nécessaires afin d'avoir une autonomie similaire au GNR muni d'un réservoir de 33 m³

LES ANALYSES ÉCONOMIQUES ET LE COÛT DE LA TRANSITION

L'indicateur retenu pour la conduite de l'analyse économique est le « Coût Total de Possession » (TCO) qui permet d'agréger l'ensemble des coûts assumés par l'opérateur d'un bateau, de l'investissement initial à la dépense énergétique, sur l'ensemble de sa durée de vie.

La comparaison économique des technologies de propulsion sur l'horizon actuel ne fait pas apparaître de solution se distinguant par un TCO particulièrement faible, tant pour les architectures de propulsion que pour les vecteurs.

En 2050, la hausse du prix des énergies fossiles rendra les configurations au GNR plus chères que les alternatives décarbonées et ce sont les carburants alternatifs biogéniques, principalement le BtL et le biogaz qui ressortent parmi les plus intéressants économiquement puisqu'ils bénéficieront d'un coût de l'énergie relativement faible (analyse basée sur des chiffres datant de 2020) grâce à la maturité des procédés industriels, et d'un investissement faible (moteur diesel d'ancienne génération).

En revanche, la question de la disponibilité et de la récupération de la matière première (déchets bois, agricoles, organiques...) permettant de produire ces biocarburants de deuxième génération n'est pas posée dans l'étude mais pourrait limiter le déploiement de ces solutions de même que la non prise en compte des bouleversements géopolitiques et énergétiques de 2022 qui nécessiteront de réactualiser les hypothèses de coûts.

L'ANALYSE ACV (ANALYSE DE CYCLE DE VIE) DU PUIT À L'ÉCHAPPEMENT

L'analyse environnementale a été conduite sous couvert de la méthodologie normée de l'Analyse Cycle de Vie, permettant de quantifier des externalités sur un périmètre plus large que le cadre des émissions du «réservoir à l'échappement». Elle a été conduite sur la base d'une analyse du puits à l'échappement (ACV énergétique) et du berceau à la tombe (ACV des GMP Groupe Moto-Propulseurs).

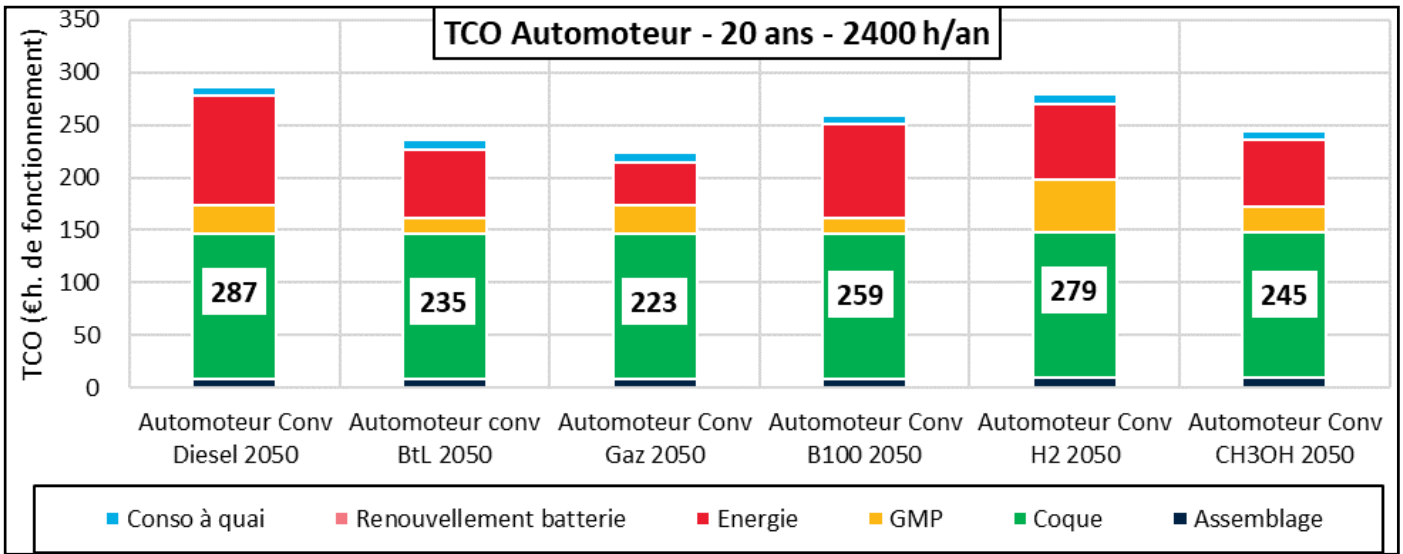
Trois catégories d'impact ont été évaluées via la méthode de caractérisation Environmental Footprint 3.0 recommandée par l'Europe :

- le changement climatique via les émissions de gaz à effet de serre (GES),
- l'impact sur la santé humaine via la formation de particules fines,
- et l'impact sur les écosystèmes aquatiques via l'écotoxicité des substances.

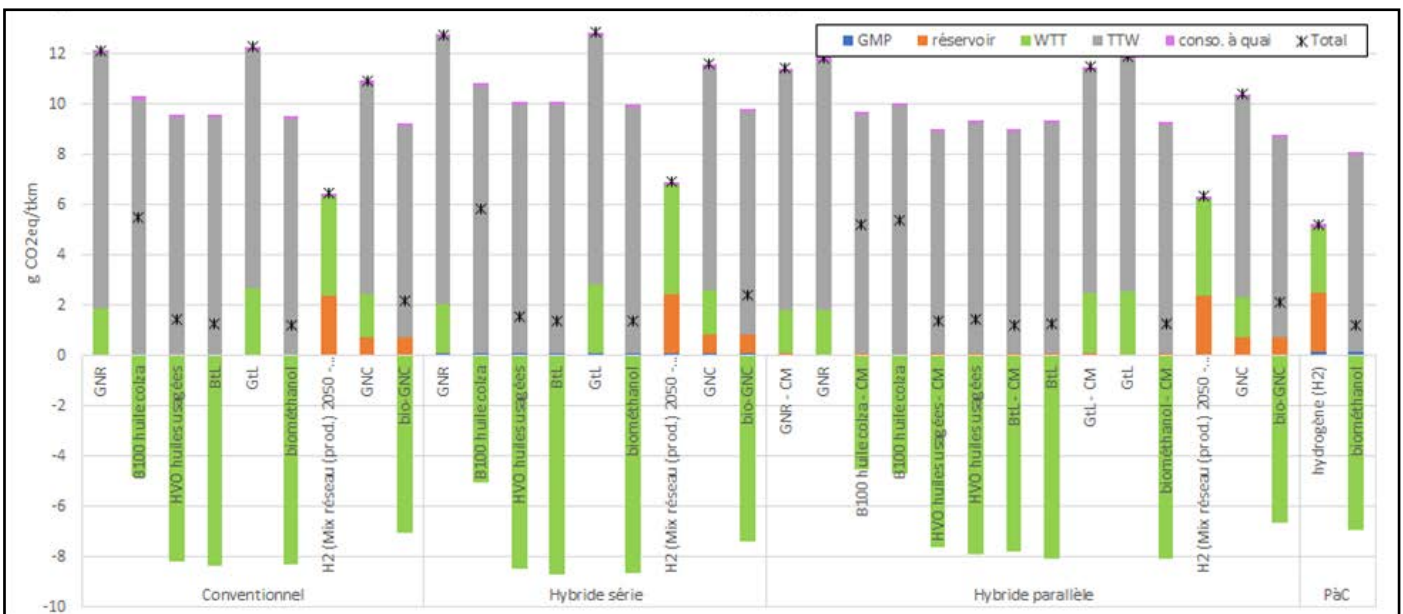
Les résultats montrent la part importante des phases « amont » des vecteurs (production, approvisionnement etc...) et de leur utilisation (consommation et émissions massiques de polluants locaux et de GES) faisant des carburants biosourcés les plus prometteurs vis-à-vis de la réduction des émissions de GES sur le périmètre du «puits à l'échappement».

De plus, les évolutions technologiques des GMP, le choix vers des carburants alternatifs tels que les HVO, BtL et biogaz, et l'électrification des bornes à quai, permettent d'atteindre de fortes réductions des émissions de GES en 2030.

La pertinence du vecteur hydrogène, de même que le méthanol, est fortement conditionnée par la source d'électricité utilisée pour l'électrolyse et potentiellement sa consommation en eau. En ce qui concerne l'hydrogène, l'impact de la fabrication des réservoirs à hydrogène en composite fibre de carbone pénalise son analyse de cycle de vie (les racks acier présenteraient un meilleur ACV et seront étudiés en 2023).



Évolution du TCO de l'automoteur en fonction du carburant, référence 2050



Impact des automoteurs sur le changement climatique, en fonction de l'architecture et du vecteur énergétique - par tkm 2050

LES 3 SCÉNARIOS DE TRANSITION

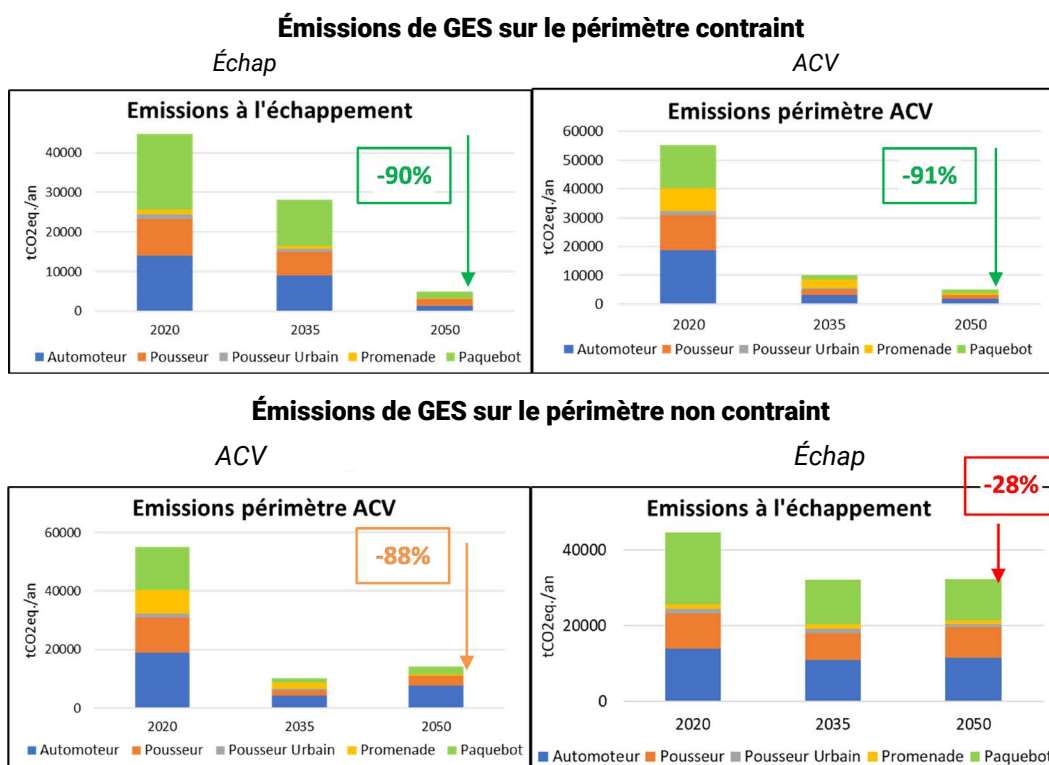
Sur la base des éléments étudiés dans les phases précédentes et qui seront prochainement complétés par une analyse des poids et encombrements, trois scénarios de transition ont été définis :

- un scénario « business as usual » qui décrit une évolution de la flotte selon une logique purement économique,
- un scénario de transition 2035 qui contraint les émissions de GES sur les périmètres «échappement» et GES «puits à l'échappement» afin de respecter des objectifs de réduction inspirés de la déclaration de Mannheim,
- et un scénario « H2 push » qui permet de visualiser l'évolution de la flotte si les performances économiques de l'hydrogène sont améliorées en 2050.

Le défi a consisté à coupler les résultats des analyses précédentes afin de projeter les impacts environnementaux de l'ensemble de la flotte du bassin Rhône-Saône à horizons 2035 et 2050 en prenant compte des coûts engendrés pour chaque scénario. **Il ressort de cet exercice que le branchement à quai, les carburants bio-sourcés (BtL) et le biogaz (bioGNV) permettent d'atteindre les objectifs de décarbonation à l'horizon 2035, tant sur le périmètre ACV que sur le périmètre des émissions à l'échappement.**

À l'horizon 2050, deux trajectoires peuvent se dessiner :

- si l'effort de décarbonation porte sur les deux périmètres « échappement » et GES (périmètre contraint sur la figure ci-dessous): un recours à l'hydrogène et au méthanol en propulsion électrique en 2050, permet de respecter la réduction des émissions de CO2 de 90% et entraîne aussi une baisse significative des émissions GES en ACV (-80%).
- si l'objectif de décarbonation porte sur le périmètre complet ACV (périmètre non contraint), un mix composé de bioGNV et de BtL garantit le respect de la contrainte de réduction des émissions sur le périmètre ACV. En revanche sur le périmètre à l'échappement, la diminution atteint à peine les 50%, ce qui présage des émissions de polluants locaux issus de la combustion de carburants carbonés.



LES PRINCIPALES RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS DE L'ÉTUDE

La réalisation des scénarios pour le bassin Rhône Saône couplée au croisement avec les conclusions des modélisations énergétiques, environnementales et économiques a permis de tirer des enseignements sur ce que seraient les objectifs de verdissement de la flotte fluviale du bassin Rhône-Saône, voire sur le plan national.

Selon l'âge du bateau et son usage, la stratégie de remotorisation ne sera pas la même. **Globalement, la trajectoire énergétique recommandée passerait dès aujourd'hui par le branchement électrique à quai, une meilleure gestion énergétique de bord relayée par le recours au HVO, BTL et bioGNC à l'horizon 2035 puis ensuite par l'hydrogène et le biométhanol à l'horizon 2050.**

- Pour les bateaux actuels, le passage à l'électrique à quai et le changement de carburant au BtL permet de diminuer significativement et immédiatement les émissions de GES,
- Pour les bateaux de petites tailles réalisant des rotations courtes, notamment de promenade ou de logistique urbaine, la propulsion électrique est recommandée,
- Pour leetrofit des propulsions des bateaux actuels et dans le cas où l'hybridation n'est pas envisageable en raison de contraintes d'intégration, les moteurs à combustion interne (ICE) EMNR au HVO, BTL et bioGNC, biométhanol ou hydrogène sont recommandés. Néanmoins, en l'absence de technologies plus ambitieuses de dépollution que l'euro 6, ces moteurs de propulsion ne s'inscrivent actuellement pas dans la trajectoire 2050,
- L'hybridation série est, en revanche, fortement recommandée pour les unités neuves navigant sur de longues distances car elle offre de nombreux avantages ; notamment celui d'adapter les puissances aux besoins des bateaux mais également de changer la source énergétique de propulsion au gré des contraintes réglementaires, permettant progressivement le passage des GMP diesel, au bioGNC puis à l'hydrogène ou au biométhanol.

Prévue en 2023, l'extension de l'étude sur l'ensemble des bassins français permettra de consolider la méthodologie et ses hypothèses, et d'établir un schéma directeur de verdissement sur le secteur fluvial au plan national.

Cette étude sera également complétée en 2023 par :

- une étude poids-encombrement prenant en compte les volumes et les poids de chaque vecteur énergétique. Elle permettra d'arbitrer, selon l'usage et le cycle des bateaux, les choix entre autonomie, poids et volume de cargaison,
- une étude complémentaire sur l'hybridation électrique,
- une étude sur la toxicité du biométhanol et son impact sur les autres usages hydrauliques du réseau fluvial (alimentation des nappes phréatiques, irrigation...)



UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION TRÈS PRATIQUE

Un tableau de bord digitalisé des résultats permettant de réaliser différentes simulations sera mis à disposition de tous en 2023 sur le site internet de VNF. Il permettra d'évaluer les différents choix de propulsion, de dégager des scénarios avec des indicateurs de coûts financiers, énergétiques et environnementaux du changement de motorisation. Les données d'entrées prospectives de ce simulateur seront régulièrement mises à jour.

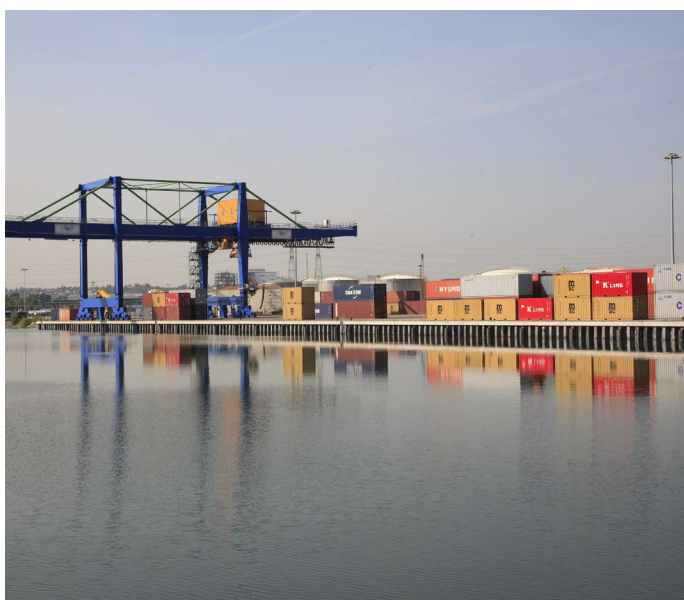
LE DÉFI DE LA STRATÉGIE DE DISTRIBUTION

La feuille de route finalisée et le choix du scénario retenu en concertation avec la profession, dans le cadre des engagements pour la croissance verte (ECV) pilotés par le ministère de la transition écologique (chargé des transports), permettront d'alimenter la stratégie de distribution voire de production d'énergie sur le domaine public fluvial.

Les ports maritimes et, dans leur continuité, les ports fluviaux représentent les nœuds énergétiques du réseau fluvial pour la diffusion dans les territoires de ces nouvelles énergies qui s'inscriront dans un mix énergétique et permettront de répondre aux objectifs 2050.

À cet égard, le transport fluvial pourra être mobilisé pour être le pourvoyeur de ces nouvelles énergies et déplacer les nombreux déchets qui produiront la matière première pour leur production.

Cet exercice prospectif présente toutefois les limites propres liées à la production des vecteurs énergétiques et à la disponibilité de la ressource nécessaire à leur utilisation, que ce soit en termes de matières premières, de capacité de transformation et d'accès à ces ressources dans un contexte tendu sur la demande (compétition avec d'autres secteurs sur le chemin de la décarbonation).



L'étude «FLUENT» a été réalisée sous maîtrise d'ouvrage de VNF par l'IFPEN.

CONTACTS VNF

Cécile COHAS, Référente nationale transition énergétique :
cecile.cohas@vnf.fr

Aurélie MILLOT, Directrice adjointe du développement :
aurelie.millot@vnf.fr

CONTACT IFPEN

Joris MELGAR, Chef de projet « Analyses technico-économiques et environnementales de la Mobilité » :
joris.melgar@ifpen.fr

L'étude «FLUENT» a reçu le soutien financier de l'Union Européenne (fonds FEDER instruits par la Région Auvergne-Rhône-Alpes), de l'ADEME et de CNR.



En partenariat avec

