

PROOF OF CONCEPT

FLUENT : Schéma de verdissement de la flotte du bassin Rhône-Saône à horizons 2035 et 2050

(juillet 2022)



Crédit Photo : VNF / Damien Lachas

Maîtrise d'ouvrage : VNF

Auteurs : IFP Energies Nouvelles

Joris Melgar
Rebecca Martin
Helen Bewi Komesse
Didier Grondin

Etude réalisée avec le soutien financier de



et en partenariat avec



Avant-propos

Les premières réflexions sur le lancement de l'étude FLUENT ont débuté en 2019 sous l'impulsion de VNF dans un cadre de recherche et développement visant l'objectif de disposer d'une vision scientifique et prospective des choix énergétiques pour les mobilités et plus particulièrement pour les usages fluviaux de passagers et de fret.

L'atteinte de cet objectif nécessitant le développement d'une méthodologie innovante combinant le croisement de modélisations énergétiques, économiques et environnementales, la réalisation de l'étude a été confiée à l'IFPEN reconnu pour sa neutralité scientifique et ses compétences industrielles multiples sur le champ des mobilités et de l'énergie.

Les résultats de l'étude FLUENT doivent permettre d'alimenter la construction d'une trajectoire de décarbonation du secteur fluvial à l'horizon 2035 et 2050 telle que préconisée dans la déclaration de Mannheim du 17 octobre 2018 et portée par l'Etat dans le cadre des engagements pour la croissance verte pour le fluvial signé en juillet 2021. Ils seront également utiles pour aiguiller VNF et les territoires sur leurs stratégies d'implantations de sites de distributions en nouvelles énergies le long du domaine public fluvial et fournir aux opérateurs fluviaux une lecture des impacts économiques, énergétiques et environnementaux des choix énergétiques qu'ils réaliseront pour leurs bateaux.

S'agissant d'une étude prospective à caractère scientifique, certaines données d'entrée pourront être qualifiées d'arbitraires. C'est la raison pour laquelle VNF et IFPEN se sont engagés à mettre à la disposition de tous un outil de simulation à partir duquel, il sera possible de faire varier les données d'entrée et obtenir des simulations affinées.

Enfin, le présent rapport porte sur la réalisation d'un Proof Of Concept (POC) spécifique au bassin Rhône Saône lequel pose les fondements d'une méthodologie (qui a vocation à être améliorée et industrialisée dans le but de disposer en 2023 de nouveaux modèles spécifiques aux autres bassins fluviaux français), à savoir :

- Les analyses de l'étude ont été menées à Iso bateaux, Iso profils de navigation ; elles ne considèrent pas de changement sur les profils de mission ni l'impact du milieu confiné sur la navigation du bateau.
- Les données qui ont été compilées pour alimenter l'étude FLUENT reposent sur le principe structurant de l'importance du couple « type de bateau et usage » et sont construites à partir des éléments suivants, pour chaque famille de bateaux :
 - D'un bateau type représentatif pour chaque famille pour lequel nous disposons de mesures en conditions réelles de navigation, de cycles de navigation et de profils de puissance par bateau pour les bassins Rhône Saône, Seine et Nord Pas de Calais (données issues des études PROMOVAN, AIRPARIF, NORLINK)
 - Les cycles de navigation et profils de puissance sont issus du traitement statistique d'enregistrements effectués dans l'étude PROMOVAN.
 - Les données d'usages (heures de navigation annuelles, chargement moyen etc...) ont été moyennées sur la base des résultats obtenus lors d'une campagne d'interview exhaustive menée par le CRMT (Centre de Recherche sur les machines Thermiques) auprès des opérateurs fluviaux sur le bassin Rhône-Saône.

- Pour les énergies les plus volumineuses (GNV et H2), les réservoirs sont dimensionnés de façon à considérer des volumes réalistes par application – mais les pertes d'autonomie ou de marchandises transportées n'ont pas été intégrées dans le scope du POC.
- En l'absence de données sur le bilan énergétique des paquebots fluviaux, la modélisation de cette famille de bateau a été réalisée à partir de profils de puissance obtenus dans l'étude PROMINENT et de données de consommations transmises par les exploitants.

Il convient de préciser les combinaisons qui n'ont pas été étudiées :

- L'utilisation du groupe de secours dans le cas des bateaux 100% électriques n'est pas modélisé en raison de son utilisation marginale (crues, manœuvres de secours).
- L'ammoniac et l'hydrogène sous forme liquide n'ont pas été considérés comme de potentiels vecteurs énergétiques, par manque de littérature et de veille sur les sujets.
- Le GNL, n'a pas été étudié en raison des fuites de gaz observées sur les projets pilotes et des difficultés opérationnelles liées à l'obligation de dégazage à chaque soutage.

De plus, l'étude n'a pas vocation à traiter les éléments suivants:

- Les risques inhérents à l'usage de chaque vecteur énergétique ; risque d'explosion pour les vecteurs gazeux ou encore écotoxicité pour du méthanol. (Une telle étude devra être réalisée par les autorités compétentes)
- La disponibilité des futurs vecteurs énergétiques bien que la plupart des données ont fait l'objet d'entretiens avec les énergéticiens et sont inspirées des études françaises et européennes (Futurs énergétiques 2050, CONCAVE, TRANSITION(S) 2050)
- La variabilité des prix de production des énergies et des aléas extérieurs qui influent sur ceux-ci (crise géopolitique etc..)

La première partie de l'étude Fluent, réalisée sur le bassin Rhône Saône, constitue, comme cela a été précisé, une preuve de concept et les travaux seront enrichis à mesure que de nouvelles données seront collectées:

- Le modèle hybride série permet d'adapter la source de production énergétique de la propulsion en fonction des différentes contraintes réglementaires. Il s'agit d'une architecture de propulsion qui permet d'inscrire durablement dans le temps le système propulsif d'un bateau dont la durée de vie moyenne atteint généralement 60 ans environ. Pour le rendre plus pertinent, ce modèle sera complété :
 - Par l'usage de plusieurs GE (Groupe Electrogène) permettant aux machines thermiques de fonctionner sur leurs points de meilleur rendement ou d'être éteinte si la demande énergétique est faible
 - Un pack batterie rechargeable vient également compléter ce modèle.
- Les données d'entrée composant les familles de bateaux seront améliorées afin d'élargir et d'affiner le nombre de cas. De nouveaux cas d'usage (nouvelles familles de bateaux) ; Freycinet, bateau promenade, pousseur de ligne, pousseur urbain, automoteur vrac, ou de conteneurs compléteront les données d'entrée du POC Rhône Saône qui seront ainsi mises à jour.

- Une étude des poids et encombrements complètera enfin les modèles énergétiques de chaque bateau ce qui permettra de prendre en compte des éléments de perte d'exploitation liés à l'utilisation de vecteur énergétique très volumiques (GNV, BIOGNV, H2) ou massiques (batteries).
- L'hypothèse que des systèmes de filtration venant améliorer suffisamment les niveaux de performances des moteurs à combustion interne sur les NOx et polluants locaux fonctionnant au HVO, BTL, BIOGAZ ou à l'hydrogène a été retenue dans le cadre d'un scénario qui fixe un objectif de -90% de réduction des émissions totales en 2050.

Nous vous remercions de l'attention que vous porterez à ces travaux dont le caractère scientifique nous permet d'appréhender, pour la première fois, la décarbonation du secteur fluvial de manière prospective.

VNF (Voies navigables de France)

Aurélie MILLOT

Cécile COHAS

Directrice adjointe du développement

Référente nationale transition énergétique

Table des matières

ABREVIATIONS.....	7
1 PRESENTATION DE L'ETUDE IFPEN-VNF	8
1.1 CONTEXTE	8
1.2 OBJECTIFS.....	8
1.3 METHODOLOGIE ET PHASES DE L'ETUDE	8
2 PERIMETRE DE L'ETUDE	10
3 DEFINITION DES CYCLES DE NAVIGATION	13
3.1 METHODOLOGIE POUR LA DEFINITION DES USAGES	13
3.2 ILLUSTRATION DES CYCLES UTILISES POUR LA MODELISATION ENERGETIQUE	14
3.3 TEMPS D'EXPLOITATION ANNUELLE DES BATEAUX	17
4 MODELISATION ENERGETIQUE DES BATEAUX	18
4.1 PRESENTATION DES OUTILS DE SIMULATION ENERGETIQUE	18
4.1.1 LOGICIEL DE SIMULATION.....	18
4.1.2 MACHINE THERMIQUE	19
4.1.3 MACHINE ELECTRIQUE	20
4.2 VALIDATION DES OUTILS.....	21
4.3 HYPOTHESE ENERGETIQUE ET PROJECTION	22
4.3.1 VECTEUR GAZOLE NON ROUTIER (GNR).....	22
4.3.2 VECTEURS ALTERNATIFS.....	23
4.3.3 CARACTERISATION DES POLLUANTS LOCAUX.....	24
4.3.4 DESCRIPTIONS DES ARCHITECTURES TESTEES	27
4.4 ANALYSE DES RESULTATS ENERGETIQUES	32
4.4.1 FAMILLE AUTOMOTEUR.....	32
4.4.2 AUTRES FAMILLES DE BATEAUX.....	38
4.4.3 CONCLUSION DE L'ANALYSE ENERGETIQUE.....	40
4.5 REFERENCES DE L'ANALYSE ENERGETIQUE	41
5 COMPARAISON TECHNICO-ECONOMIQUE DES SOLUTIONS DE PROPULSION.....	44
5.1 METHODOLOGIE DE L'ANALYSE ECONOMIQUE.....	44
5.1.1 L'INDICATEUR TCO.....	44
5.1.2 STRUCTURE DE COUTS ETUDIEE	46
5.1.3 LES CAS D'ETUDE	46
5.1.4 COUTS LIES L'INVESTISSEMENT.....	47
5.1.5 COUTS D'OPERATION	49
5.2 OUTIL DE CALCUL ET DE COMPARAISON DU TCO.....	50
5.3 COMPARAISON DES SOLUTIONS ALTERNATIVES.....	51
5.4 ANALYSES DE SENSIBILITE	54
5.4.1 CONSOMMATION DE CARBURANT	54
5.4.2 DUREE DE VIE MOTEUR.....	54
5.5 RESULTATS MARQUANTS SUR LES AUTRES FAMILLES DE BATEAUX.....	56
5.6 CONCLUSION DE L'ANALYSE ECONOMIQUE	57

6	ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DES SOLUTIONS DE PROPULSION AU TRAVERS DE L'ANALYSE CYCLE DE VIE (ACV)	58
6.1	LA METHODOLOGIE D'ACV	58
6.2	OBJECTIF ET CHAMP DE L'ETUDE	60
6.2.1	OBJECTIF	60
6.2.2	CHAMP DE L'ETUDE	60
6.2.3	PERIMETRE DE L'ETUDE	60
6.2.4	UNITE FONCTIONNELLE	61
6.2.5	INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX	62
6.3	INVENTAIRE DU CYCLE DE VIE	63
6.3.1	GROUPES MOTOPROPULSEURS	63
6.3.2	RESERVOIRS	64
6.3.3	VECTEURS ENERGETIQUES	65
6.4	RESULTATS D'IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX (AUTOMOTEURS)	69
6.4.1	IMPACT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	70
6.4.2	IMPACT SUR LA SANTE HUMAINE DU A LA FORMATION DE PARTICULES FINES	722
6.4.3	IMPACT SUR L'ECOTOXICITE AQUATIQUE	74
6.4.4	AUTRES APPLICATIONS	76
6.5	LIMITES DE L'ETUDE	77
6.6	CONCLUSION	78
6.7	REFERENCES DE L'ANALYSE ENVIRONNEMENTALE	79
7	PROJECTION ET SCENARII DE VERDISSEMENT DE LA FLOTTE RHONE-SAONE	81
7.1	SITUATION ACTUELLE SUR LE BASSIN RHONE-SAONE	81
7.1.1	ORGANISATION DU BASSIN	81
7.1.2	ELECTRIFICATION DE LA RECHARGE A QUAI	81
7.2	METHODOLOGIE DE LA PROJECTION DE LA FLOTTE	82
7.2.1	LES SCENARIOS RETENUS	82
7.2.2	OPTIMISATION SOUS CONTRAINTES	83
7.3	RESULTATS	83
7.3.1	BUSINESS AS USUAL (BAU)	83
7.3.2	NEUTRALITE CARBONE 2050	84
7.3.3	H2PUSH	87
7.4	CONCLUSION	89
7.5	ANNEXES DE LA PHASE DE PROJECTION DES RESULTATS	90
7.5.1	PROJECTION DE LA FLOTTE SUR LE BASSIN RHONE-SAONE, PAR FAMILLE DE BATEAUX	90
7.5.2	DETAIL DES RESULTATS SCENARIO BUSINESS AS USUAL	91
7.5.3	DETAILS DU SCENARIO H2PUSH	91
7.5.4	REPARTITION DES SOLUTIONS DE PROPULSION PAR FAMILLE DE BATEAUX POUR TOUS LES SCENARII	92
7.5.5	CONSOMMATION DES VECTEURS ENERGETIQUES	93
8	REFERENCES DES ANALYSES ECONOMIQUES ET PROSPECTIVES	94

Abréviations

ACV	Analyse Cycle de Vie
BtL	<i>Biomass to Liquid</i>
EMAG	Ester Méthylique d'Acide Gras
EnR	Energies Renouvelables
GES	Gaz à Effet de Serre
GMP	Groupe motopropulseur
GNC	Gaz Naturel Compressé
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
GNR	Gazole Non Routier
GtL	<i>Gas to Liquid</i>
H2	Hydrogène
HOT	<i>Hybrid Optimization Tool</i> = Outil d'optimisation des architectures hybrides (outil faisant partie du logiciel Simcenter Amesim™)
HVO	<i>Hydrotreated Vegetable Oil</i> = Huile Végétale Hydrotraité
PAC	Pile à Combustible (potentiellement noté FC pour Fuel Cell)
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i> = Pile à Combustible à Membrane d'Echange de Protons
PRG	Pouvoir de Réchauffement Global
TCO	Total Cost of Ownership = Cout Total de Possession
TTW	<i>Tank To Wheel</i> = "du réservoir à la roue" (acronyme fréquemment exploité dans le secteur routier)
VNF DTRS	Voies Navigables de France Direction Territoriale Rhône
WTT	<i>Well To Tank</i> = "du puits au réservoir"

1 Présentation de l'étude IFPEN-VNF

1.1 Contexte

L'objet de la présente étude est la réalisation d'un travail de recherche et d'analyse prenant la forme d'un schéma directeur de verdissement et d'avitaillement en nouvelles énergies de la flotte fluviale du bassin Rhône-Saône. Il fait suite au renforcement juridique récent et aux objectifs de développement durable et de transition énergétique imposés dorénavant aux Etats membres de l'Union européenne.

Plus précisément, la présente étude s'inscrit dans le prolongement des nouvelles contraintes environnementales imposées aujourd'hui aux véhicules motorisés. En effet, le cadre technique et économique de ces impératifs environnementaux est inexistant pour certains modes de transport comme l'illustre parfaitement le cas du transport fluvial. Il n'en demeure pas moins que le transport fluvial devrait faire partie intégrante de la stratégie nationale de décarbonation du transport. Par conséquent, une démarche initiale de R&D ayant pour objet l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation des nouvelles technologies visant à réduire les impacts environnementaux des motorisations futures est nécessaire.

Cette analyse des impacts environnementaux doit s'accompagner d'une analyse technico-économique dans le but d'identifier les coûts prospectifs afin de quantifier l'impact financier de la mise en œuvre de ces solutions.

1.2 Objectifs

L'étude menée par IFPEN a pour objectif de fournir une analyse multicritère des solutions innovantes de propulsion des bateaux de façon à établir une vision prospective de réduction de l'impact environnemental des bateaux composant la flotte du bassin Rhône-Saône. Cette vision prospective se traduira notamment par la construction d'outils d'analyses – énergétique, économique et environnementale – et de projection de la composition de la flotte sur 2 horizons de temps futurs : 2035 et 2050, inspirés des objectifs fixés dans la Déclaration de Mannheim du congrès CCNR de 2018 [58].

Le développement de ces outils pour l'analyse du bassin Rhône-Saône constitue une première étape dans l'établissement d'une méthodologie d'analyse holistique du secteur fluvial. Les retours des partenaires sur les hypothèses et les limites de l'étude permettent d'améliorer la méthodologie pour des perspectives de suites, dont l'analyse d'autres bassins.

1.3 Méthodologie et phases de l'étude

Différentes phases ont été identifiées pour atteindre l'établissement d'une vision prospective de verdissement du bassin Rhône-Saône :

- **Une phase de recensement des bateaux** navigant sur le bassin Rhône-Saône : la consultation des armateurs et opérateurs a été menée par le CRMT sur l'année 2020. Le recensement a abouti à la collecte de données sur les motorisations et les usages d'environ 80% de la flotte (elle-même composée d'un total de 191 bateaux).
- **Une phase de définition des cycles de navigation** des différentes familles de bateaux modélisées
- **Une phase de définition des dimensionnements des solutions de propulsion** pour l'ensemble des bateaux modélisés
- **Une phase de modélisation** et de comparaison **énergétique** des différentes solutions de propulsion menée au travers de la « simulation système » et du logiciel *Simcenter Amesim™*

- **Une phase de calcul technico-économique** des solutions de propulsion, débouchant sur la création d'un outil de comparaison des coûts des motorisations et d'utilisation des vecteurs énergétiques alternatifs
- **Une phase d'analyse environnementale** des solutions de propulsion au travers de la méthodologie de l'Analyse Cycle de Vie (ACV), débouchant sur la création d'un outil de comparaison des catégories d'impact environnemental retenues dans le cadre de l'étude : changement climatique, formation de particules et écotoxicité aquatique.
- **Une phase de projection de la composition de la flotte du bassin** selon une méthodologie d'optimisation sous contraintes des résultats des phases précédentes. Les sorties de cette phase permettent de projeter les demandes énergétiques de la flotte, pour différents scénarii économiques et environnementaux de verdissement du bassin Rhône-Saône ;

2 Périmètre de l'étude

La réduction des impacts environnementaux des bateaux navigant sur le bassin Rhône-Saône - dont l'impact sur le changement climatique - peut être potentiellement réalisée grâce à l'introduction de nouvelles solutions de propulsion. Ces solutions peuvent résider dans un changement du groupe-motopropulseur (GMP) - à savoir des architectures ne s'appuyant plus uniquement sur un moteur à combustion interne ; ces solutions peuvent également se traduire par l'exploitation d'un carburant ou vecteur énergétique moins émetteur de gaz à effet de serre ou de polluants locaux. A fortiori, les solutions de propulsion peuvent être des combinaisons, associant par exemple des architectures électrifiées avec des carburants alternatifs. Il existe donc en réalité une multitude de configurations permettant potentiellement de répondre à la problématique du « verdissement » des bateaux du bassin Rhône-Saône.

La présente étude se restreint à l'analyse des potentiels économiques et environnementaux de 6 architectures et de 8 types de vecteurs énergétiques, configurations jugées pertinentes pour les applications fluviales.

Les architectures de groupe-motopropulseurs investiguées sont :

- Conventionnelle (moteur thermique – combustion interne)
- Hybride parallèle (un moteur thermique – identique à l'architecture conventionnelle - en parallèle d'une machine électrique alimentée par une batterie)
- Hybride parallèle avec changement du moteur thermique et de la machine électrique (réduction de la cylindrée du moteur thermique et augmentation de la puissance électrique)
- Hybride série (une machine électrique de propulsion alimentée par un groupe électro-générateur et une batterie tampon - sans prise en compte d'un réseau de bord et d'une gestion à la demande du démarrage de plusieurs groupes électrogènes en parallèle)
- Tout électrique à batterie
- Pile à Combustible (PAC, voir Tableau 2 : Matrice des cas d'étude)

Les vecteurs énergétiques investigués sont :

- Diesel, nommé Gazole Non Routier (GNR)
- Huile Végétale Hydrotraité – *Hydrotreated Vegetable Oil* (HVO)
- Ester méthylique d'acide gras (EMAG) – formulation B100
- Biodiesel de synthèse – issu de source gaz (GtL) ou de biomasse (BtL)
- Gaz et biogaz – stockage liquéfié (GNL) et comprimé (GNC)
- Dihydrogène, appelé communément « hydrogène » (H2) – au travers des architectures PAC et conventionnelle
- Méthanol de source biologique (noté biométhanol) – au travers des architectures PAC et conventionnelle
- L'électricité pour les bateaux tout électrique à batterie

Les familles de bateaux identifiées pour représenter la flotte du bassin Rhône-Saône sont :

- Automoteur (transport de marchandises) – longueur de 110 m, largeur de 11 m, 3000 tonnes en charge
- Pousseur de ligne (transport de marchandises) – longueur de 22 m, largeur de 9 m, 400 tonnes et 2 barges de 2600 chacune en charge
- Pousseur urbain (transport de marchandises) – longueur de 15 m, largeur de 5 m
- Promenade (transport de passagers) – longueur de 30 m, largeur de 4 m, 44 tonnes sans les passagers
- Paquebot (transport de passagers) – longueur 135m (voir PROMINENT [1])

L'analyse du recensement des bateaux par le CRMT fait apparaître la très grande disparité des groupes motopropulseurs au sein d'une même famille, comme illustrée en Figure 1. Les différences sur les propulsions des bateaux portent sur la puissance des moteurs thermiques entraînant les hélices, mais aussi sur le nombre d'arbres « hélice ». Ces disparités, qui sont caractéristiques du transport fluvial, se retrouvent également dans l'âge des coques et dans les dimensions des bateaux présents sur le bassin.

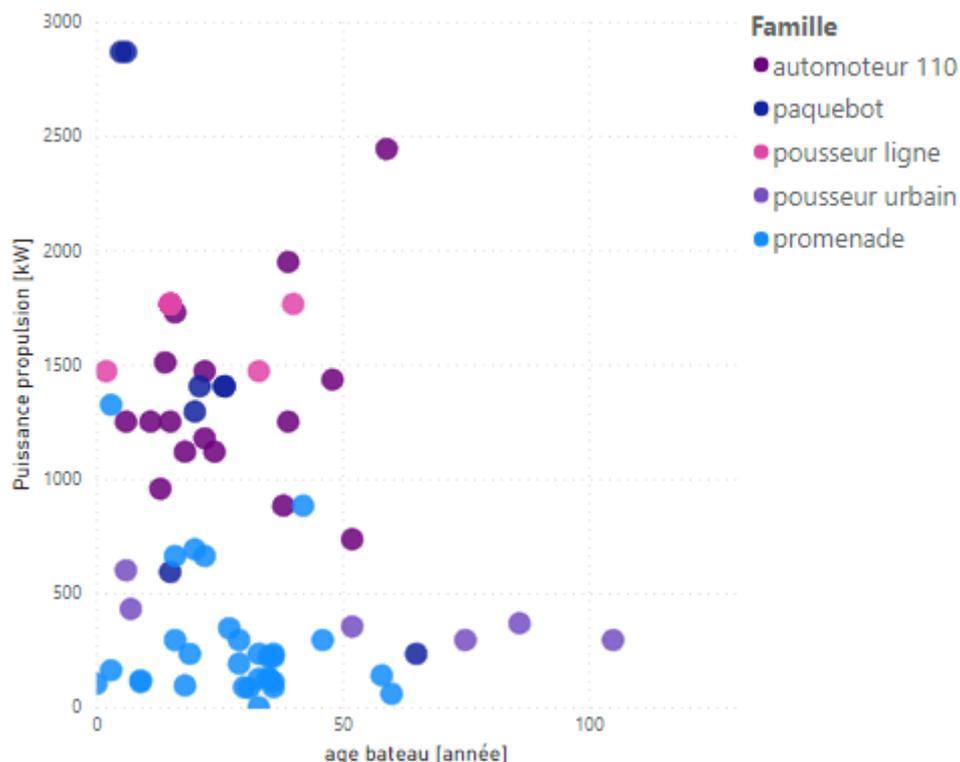


Figure 1 : Puissances totales de propulsion et âges des bateaux du bassin Rhône-Saône pour lesquels des données ont pu être collectées

De façon à représenter chacune des familles de bateaux de l'étude, des dimensionnements des groupes motopropulseurs de référence ont été choisis en concertation avec VNF Direction Territoriale Rhône-Saône. Ces références concernent l'architecture conventionnelle, qui est l'architecture dominante sur le bassin en 2020 : seuls 11 bateaux ont été déclarés comme étant hybridés (pour la majorité des paquebots en configuration « diesel-électrique ») et 4 comme étant électriques (petites applications de promenade dont la puissance est inférieure à 200 kW) par les armateurs. Ces dimensionnements, cohérents avec les résultats du recensement du bassin, inspirés des bateaux instrumentés dans l'étude PROMOVAN (voir section 3.1 *Méthodologie pour la définition des usages*) et explicités en Tableau 1 permettent de décliner les caractéristiques des groupes motopropulseurs pour l'ensemble des architectures listées précédemment.

Tableau 1 : Dimensionnement des propulsions des bateaux de référence pour les familles considérées dans l'étude

Famille de bateaux	Automoteur	Pousseur de ligne	Pousseur urbain	Promenade	Paquebot
Puissance de propulsion du bateau	1 x 1250 kW	2 x 920 kW	1 x 400 kW	2 x 120 kW	2 x 820 kW

La matrice des cas d'étude donnée en Tableau 2 présente les bateaux modélisés pour les comparaisons énergétiques, économiques et environnementales. Les caractéristiques énergétiques de ces configurations seront détaillées dans les phases suivantes du rapport. A noter que cette matrice des cas analysés est déclinée sur 3 horizons temporels (actuel, 2035 et 2050), conduisant ainsi à la modélisation d'environ 400 à 500 bateaux selon les phases de l'étude.

Tableau 2 : Matrice des cas d'étude

Architectures	Vecteurs	Automoteur	Pousseur de ligne	Pousseur urbain	Promenade	Paquebot
Conventionnel	Diesel – Biodiesel	X	X	X	X	X
	Gaz – Biogaz	X	X	X	X	X
	Hydrogène	X	X	X	X	X
	Biométhanol	X	X	X	X	X
Hybride Parallèle	Diesel – Biodiesel	X	X	X	X	X
	Diesel – Biodiesel (adaptation taille moteur)	X	X	X	X	X
	Gaz – Biogaz	X	X	X	X	X
	H2	X	X	X	X	X
	Biométhanol	X	X	X	X	X
Hybride Série	Diesel – Biodiesel	X	X	X	X	X
	Gaz – Biogaz	X	X	X	X	X
	Hydrogène	X	X	X	X	X
	Biométhanol	X	X	X	X	X
Pile à combustible	Hydrogène	X	X	X	X	X
	Biométhanol (avec réformeur externe)	X	X	X	X	X
Electrique		-	-	X	X	-

3 Définition des cycles de navigation

3.1 Méthodologie pour la définition des usages

La modélisation énergétique des bateaux réalisée dans cette étude i.e. le calcul des consommations énergétiques des différentes solutions de propulsion prend comme données d'entrée des profils de puissances appliquées aux groupes motopropulseurs. La relation entre la vitesse de déplacement du bateau et la puissance « hélice » associée dépend d'un grand nombre de paramètres liés à la structure du bateau (carénage, tonnage etc...) et aux conditions de navigation (courant, largeur et profondeur du cours d'eau etc...).

La Figure 2 illustre la forte dépendance de la puissance de propulsion aux conditions de navigation en milieu confiné, en l'occurrence ici à la section du cours d'eau traversée. Le graphe montre que la réduction de moitié de la profondeur impose une augmentation de la puissance de propulsion du bateau étudié d'un facteur 28 pour maintenir une vitesse de 10 km/h, soit le passage de 50 kW à près d'un 1,4 MW.

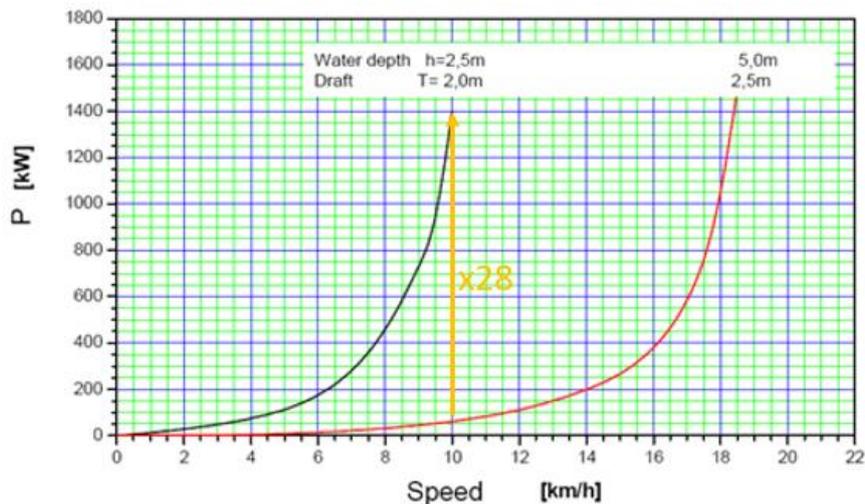


Figure 2 : Puissances de propulsion en fonction de la vitesse de déplacement du bateau pour 2 sections de milieu confiné (extrait DST, congrès CCNR 2011)

La modélisation physique de cette relation qui permettrait de calculer la puissance de propulsion selon les dimensions des bateaux étudiés et les caractéristiques hydrodynamiques du bassin Rhône-Saône n'est pas traitée dans la présente étude, notamment en raison du trop grand nombre de données nécessaires, variables et difficilement quantifiables.

Les profils de puissance de propulsion – caractéristiques des usages des familles de bateaux considérées et des conditions de navigation sur le bassin – utilisés dans cette étude pour déterminer les consommations énergétiques sont extraits de l'étude PROMOVAN [2–4] conduite par l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR, Université Gustave Eiffel) et le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA) et pilotée par VNF sous le contrôle scientifique de CFT (opérateur fluvial). Une campagne de mesures (instrumentation du couple et du régime des hélices) menée sur différentes familles de bateaux (promenade, pousseur de ligne et automoteur) pendant plusieurs semaines sur le bassin Rhône-Saône a permis aux auteurs de l'étude de mettre en évidence la variabilité des sollicitations du groupe motopropulseur pour un même type de mission et d'établir des profils de puissances caractéristiques des usages de chacun des bateaux.

3.2 Illustration des cycles utilisés pour la modélisation énergétique

Les mesures collectées dans le cadre du projet PROMOVAN et leur analyse par l'IFSTAR ont conduit à l'établissement de cycles statistiques moyens représentatifs de la dépense énergétique des typologies automoteur, pousseur de ligne et promenade sur le bassin Rhône-Saône (en combinant donc la totalité des conditions de navigation rencontrées au cours des enregistrements, en particulier les phases de descente et de remontée du fleuve). Ces cycles sont pertinents pour la comparaison énergétique, économique et environnementale : ils ont donc été repris comme données d'entrée dans la présente étude, afin notamment de calculer les consommations énergétiques.

La Figure 3, la Figure 4 et la Figure 5 représentent les points de fonctionnement des moteurs correspondant à ces différents profils de puissance de propulsion pour chacune des applications. La proportion du temps passé sur ces points de fonctionnement est également quantifiée sur les tracés. On constate que pour ces architectures conventionnelles, les points de fonctionnement en régime stabilisé se trouvent sur la « courbe d'hélice » qui lie proportionnellement le couple moteur au carré du régime moteur. Les phases de transitoire des moteurs ne sont pas prises en compte dans ces cycles car ces phases sont négligeables au regard des temps passés en navigation sur des fonctionnements stabilisés. On peut constater sur les figures que les sollicitations moyennes des moteurs sont différentes selon les applications : l'automoteur exploite son moteur majoritairement sur des points de puissances élevées tandis que le pousseur de ligne exploite ses 2 moteurs plutôt sur des charges moyennes. Enfin le bateau promenade exploite ses 2 moteurs principalement sur des faibles charges, potentiellement en raison d'un surdimensionnement de son groupe-motopropulseur, mais plus vraisemblablement en raison d'une campagne de mesure menée sur une période relativement courte et atypique – comme explicité dans le rapport PROMOVAN [2].

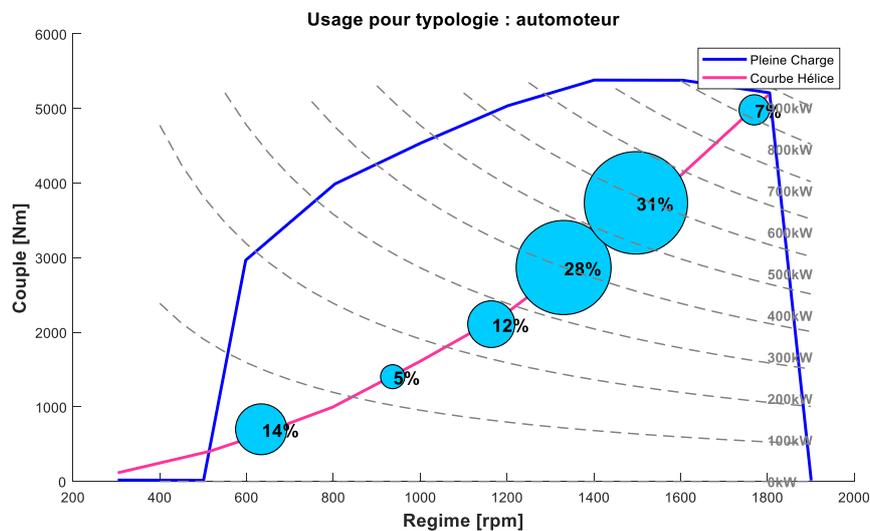


Figure 3 : Points de fonctionnement moteur représentatif de l'usage pour « automoteur »

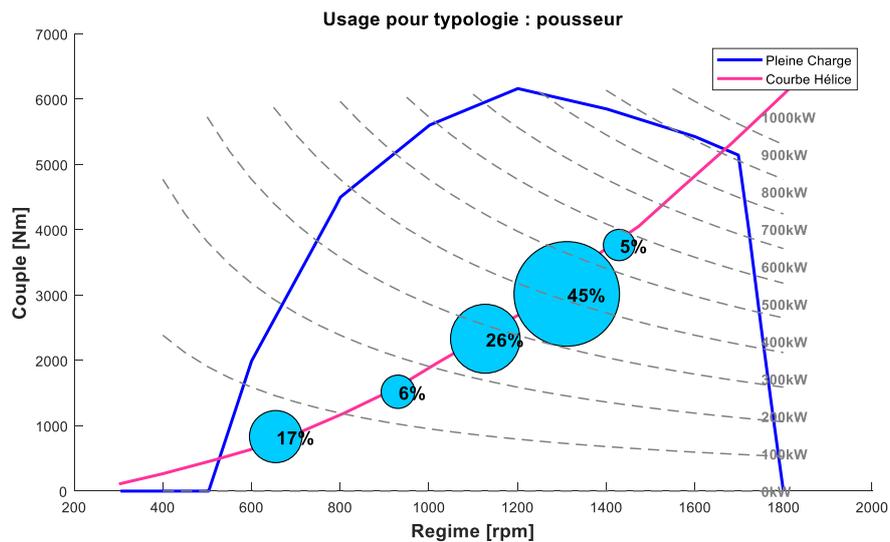


Figure 4 : Points de fonctionnement moteur représentatif de l'usage pour « pousseur de ligne »

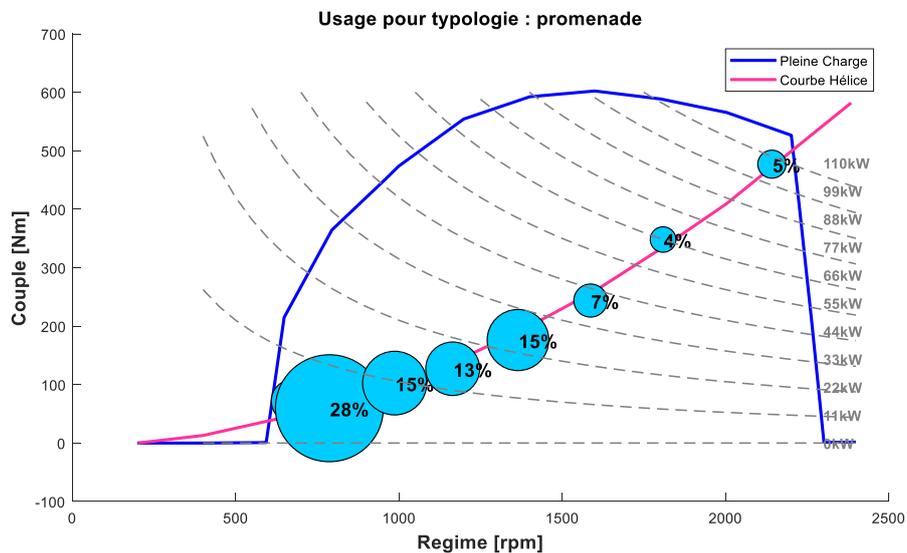


Figure 5 : Points de fonctionnement moteur représentatif de l'usage pour « promenade »

Il est important de mentionner que ces cycles représentatifs sont dépendants de la quantité et de la qualité des mesures effectuées sur les bateaux lors de l'étude PROMO VAN. Les données collectées pour le bateau de promenade lors de l'expérimentation n'ont pas été jugées représentatives - par les auteurs du rapport PROMO VAN - des conditions générales de navigation de ce type de bateaux, mais ont le mérite d'illustrer un usage sur le bassin Rhône-Saône.

Les familles de bateaux « paquebot » et « pousseur urbain » n'ont pas fait l'objet de campagnes de mesures dans le cadre du projet PROMO VAN. L'établissement de cycles représentatifs pour ces familles a été fait à partir de données provenant de deux sources différentes :

- Pour la famille « paquebot » : une distribution temporelle des puissances de propulsion a été extraite du projet européen PROMINENT [1]. Cette distribution, générée via une approche simulation, concerne un paquebot de 135m de long navigant entre Basel et Amsterdam – représentatif des croisières proposées par les trois opérateurs principaux sur ce bassin. De même que pour les profils présentés précédemment, les contributions des phases de descente et de remontée sont prises en compte. Ce profil représentatif n'est pas issu de mesures

expérimentales, ni de données provenant du bassin Rhône-Saône. La Figure 6 illustre les points de fonctionnement du cycle représentatif utilisé dans l'étude pour l'application « paquebot fluvial », ramené sur un arbre moteur. On constate qu'il existe sur cette représentation plus de points de fonctionnement que pour les cycles des applications présentées précédemment, avec une concentration plus forte de ces points sur les zones de charges moyennes (on considère que la puissance est assurée par 2 moteurs thermiques fonctionnant en parallèle).

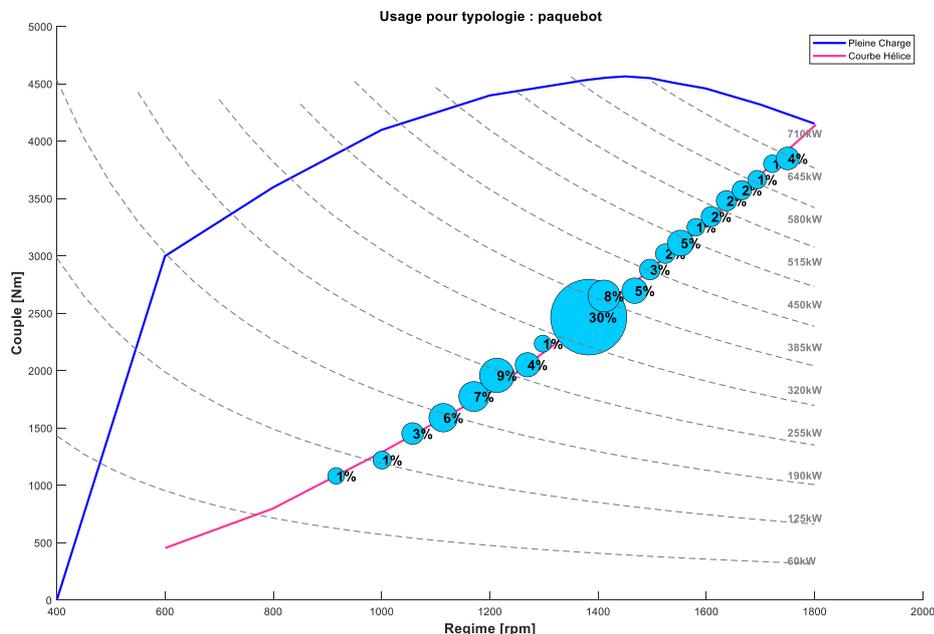


Figure 6 : Points de fonctionnement moteur représentatif de l'usage pour « paquebot fluvial »

- Pour la famille « pousseur urbain » : les données d'une campagne de mesures effectuées sur un pousseur urbain du bassin Seine ont été exploitées, faute de données disponibles sur le bassin Rhône-Saône. Ces données ont été transmises par la Communauté Portuaire de Paris, elles correspondent au profil d'une mission journalière caractéristique pour ce type d'application selon l'opérateur du bateau instrumenté en 2020. La Figure 7 illustre les points de fonctionnement du cycle représentatif utilisé dans l'étude pour l'application « pousseur urbain ». Comme on peut le constater, le fonctionnement du bateau et la sollicitation du GMP est relativement stabilisé sur la pleine puissance.

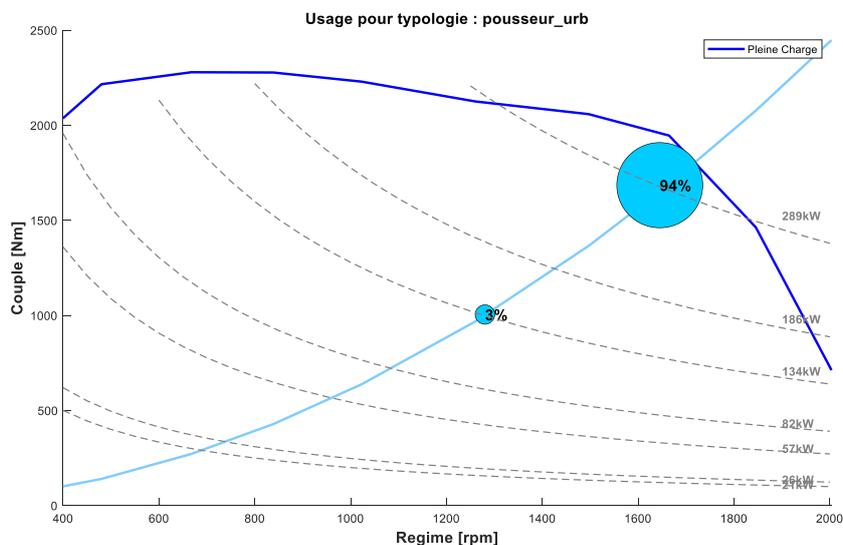


Figure 7 : Points de fonctionnement moteur représentatif de l'usage pour "pousseur urbain"

A noter que seule la dépense énergétique liée à la propulsion des bateaux est considérée dans l'établissement des données d'entrée pour la modélisation énergétique présentée dans la section suivante (section 4 *Modélisation énergétique des bateaux*). Le CEA note dans sa version du rapport PROMOVAN [4] que la propulsion est le poste principal de consommation énergétique pour les bateaux instrumentés (pousseur et automoteur), elle représente 98% de la dépense énergétique totale (le reste étant attribué au propulseur d'étrave pour les manœuvres et aux consommations de bord).

On rappelle à nouveau que les profils de missions dépendent de chaque bateau du bassin et que par conséquent les analyses de l'étude ne sauraient être généralisables à des usages différents.

3.3 Temps d'exploitation annuelle des bateaux

Enfin la caractérisation des usages passe également par la détermination des heures de fonctionnement annuelles de chacune des familles de bateaux. L'analyse du recensement effectué par le CRMT a permis de collecter des estimations exprimées par les armateurs, les moyennes des données collectées sont données dans le Tableau 3. Ces informations sont nécessaires pour les calculs économiques et environnementaux menés dans les phases suivantes de l'étude.

Tableau 3 : Temps d'exploitation en heures par an et par famille de bateaux

Famille de bateaux	Heures de fonctionnement annuelles sur le bassin Rhône-Saône
Automoteur	2400
Pousseur de ligne	1500
Pousseur urbain	2000
Promenade	650
Paquebot	1092

4 Modélisation énergétique des bateaux

4.1 Présentation des outils de simulation énergétique

L'analyse multicritères présentée dans cette étude s'appuie dans un premier temps sur la comparaison énergétique des différentes solutions de propulsion listées dans la section 2 *Périmètre de l'étude*. Elle a pour objectif d'établir l'ensemble des consommations énergétiques des configurations pour les usages retenus et présentés dans la section précédente, et ce sur la base d'une méthodologie commune : la « simulation système ». Ces consommations permettront par la suite d'alimenter les analyses économiques et environnementales.

4.1.1 Logiciel de simulation

La simulation énergétique a été menée à l'aide du logiciel *Simcenter Amesim™* de l'éditeur Siemens PLM Software. C'est plus particulièrement l'outil *Hybrid optimization tool (HOT)* - co-développé par IFP Energies nouvelles qui est exploité dans l'étude énergétique. L'outil permet, via une interface interactive, de définir le groupe motopropulseur et d'obtenir sa consommation énergétique (groupe motopropulseur) pour un usage donné [5].

La consommation énergétique est ensuite déterminée à partir de la puissance de propulsion, des rendements énergétiques, des dimensionnements des composants de l'architecture de propulsion et du gestionnaire d'énergie. La modélisation des groupes motopropulseurs dans HOT a été validée au cours de plusieurs années de développement en s'appuyant sur les moyens expérimentaux d'IFP Energies nouvelles (IFPEN) - à savoir des bancs moteurs thermiques, machines électriques et batteries ainsi que des bancs à rouleaux sur lesquels sont instrumentés les véhicules.

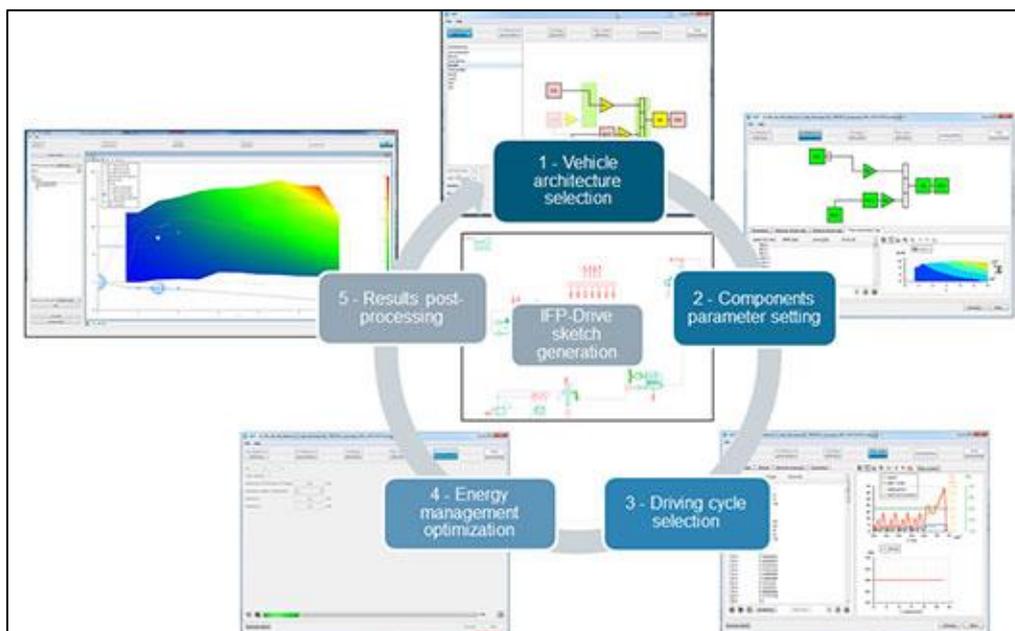


Figure 8 : Présentation de l'outil de modélisation énergétique [5]:

La puissance de propulsion découle du profil de vitesse renseigné en entrée de l'outil :

$$Puiss_{propulsion} = Coef_1 * V + Coef_2 * V^2 + Coef_3 * V^3 \quad (4-1)$$

HOT ayant été initialement développé pour simuler des véhicules routiers suivant des profils de vitesses, une adaptation est nécessaire pour imposer les cycles de puissance au niveau de l'hélice. Elle consiste à établir une vitesse fictive permettant de reproduire la puissance de propulsion du bateau (issue des usages analysés en section 3 Définition des cycles de navigation).

L'équation (4-1) devient alors :

$$Puiss_{resist} = Coef_3 * V_{fictive}^3 \quad (4-2)$$

Le Coef₃ (N/(m/s)²) est exprimé par :

$$Coef_3 = a * \frac{60^2}{r^3 * \pi^2 * 2^2} \quad (4-3)$$

Avec « r » égal à un rayon de roue fictive fixé ici à 0,27 m.

Le paramètre « a » correspond à la loi d'hélice du bateau tel que défini dans l'équation (4-4) et décrit dans la section 3 *Définition des cycles de navigation* :

$$a = \frac{C_{hélice}}{\Omega_{hélice}^2} \quad (4-4)$$

La vitesse fictive est recalculée à partir du régime moteur via l'équation (4-5) :

$$V_{fictive} = régime * \frac{2\pi}{60} * r \quad (4-5)$$

Les valeurs de « coeff 3 » sont reportées dans le Tableau 4. Elles sont données à titre indicatif, à des fins de reproduction des modélisations dans l'outil HOT ; on rappelle que ces coefficients n'ont pas de réalité physique et qu'ils permettent d'imposer les profils de puissance aux groupes motopropulseurs évalués dans l'analyse énergétique.

Tableau 4 : Coefficient 3 retenu pour les différentes architectures de bateau

Bateau	Coeff 3 (N/(m/s) ²)
Automoteur	1267.16
Paquebot	1013.72
Pousseur	1453.25
Pousseur Urbain	1453.25
Promenade	4.37

Les valeurs de loi d'hélice utilisées pour les architectures de bateau Automoteur, Pousseur, et Promenade sont celles du rapport PROMO VAN [2]. Les valeurs similaires du coefficient 3 pour les applications « Pousseur » et « Pousseur urbain » traduisent l'utilisation de la même loi d'hélice. N'ayant pas accès à cette valeur dans le cas du « pousseur urbain » instrumenté sur le bassin Seine, le choix a été fait de la garder identique au pousseur. De manière similaire, la loi d'hélice de l'architecture Paquebot est une homothétie du cas Pousseur. Ces lois d'hélice traversent les cartographies de consommation des moteurs associés de façon similaires, elles passent notamment par le point de puissance maximale (voir la Figure 3, la Figure 4, la Figure 5, la Figure 6 et la Figure 7).

4.1.2 Machine Thermique

Les machines thermiques sont modélisées via des cartographies de consommation. Ces cartographies sont lues de manière « quasi-statiques », en fonction des points de fonctionnement nécessaires au suivi du cycle de propulsion imposé (points définis par l'outil HOT). A noter que les transitoires sont négligés dans cette approche. Ces données sont issues des travaux menés dans le projet PROMO VAN ou reconstruites à partir de données internes IFPEN.

Le Tableau 5 liste les moteurs de référence modélisés pour les différentes applications (et vecteurs énergétiques dans les cas « hydrogène » et « gaz »). Une homothétie est effectuée afin d'obtenir les puissances souhaitées et un facteur est appliqué afin d'ajuster les rendements pour les différents horizons de temps visés. Les hypothèses de rendement choisies sont décrites dans la section 4.3 de ce document. Mis à part les moteurs thermiques pour les vecteurs « hydrogène », gaz et XTL, les moteurs thermiques sont basés sur la même cartographie que le moteur thermique GNR correspondant à l'architecture considérée.

Tableau 5 : Cartographies de référence des moteurs thermiques utilisés pour les simulations

Bateau	Moteur (vecteur énergétique)
Automoteur	Caterpillar 3512 (Diesel)
Paquebot	Caterpillar 3508B (Diesel)
Pousseur	D49 (Diesel)
Pousseur Urbain	OM471_12.8l (Diesel)
Promenade	IVECO 8.1L (Diesel)
Hydrogène	Keyou 7.8L (H2)[6]
Gaz	Cursor 13 (Gaz)

4.1.3 Machine Electrique

Les machines électriques sont dimensionnées via l'outil de génération de cartographies associé au logiciel *Simcenter Amesim™*. Plus particulièrement, les cartographies des machines électriques sont générées via le module *Electric Motor Tables Creator*. La Figure 9 illustre l'interface de l'outil pour la génération des données énergétiques des machines électriques.

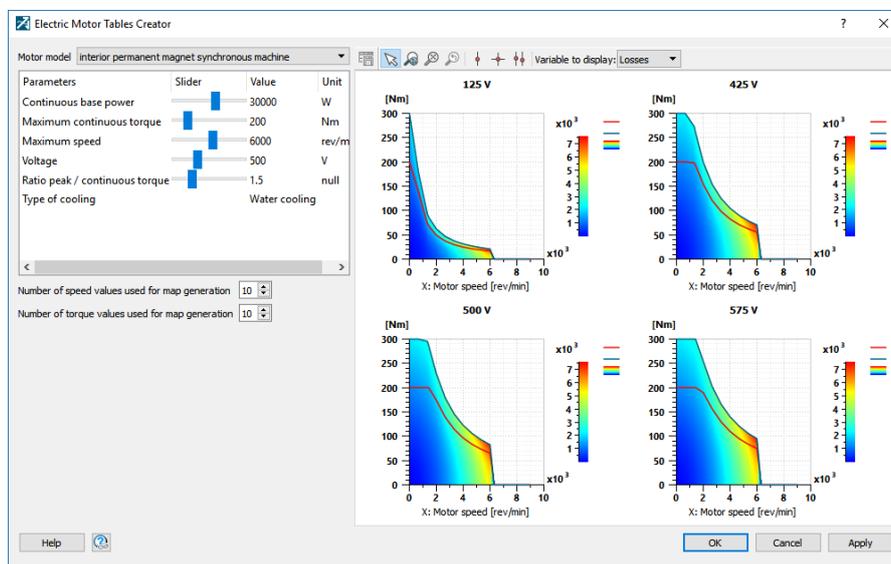


Figure 9 : Présentation du module de génération de cathographie de machine electrique

Cet outil permet à l'aide de quelques paramètres macroscopiques, tels que la puissance souhaitée, le régime et le couple maximum, de générer des cartographies de pertes de puissances mécaniques et électriques et de les utiliser dans les simulations des groupes motopropulseurs. Les rendements des machines dépendent donc de leur dimensionnement (entre 90% et 98% selon les architectures et les points de fonctionnement). Les rendements maximums ne prennent en compte que la machine électrique. Les pertes dues à l'électronique de puissance sont négligées, les rendements des composants type « onduleur » étant très élevés.

4.2 Validation des outils

Afin de valider l'exploitation des outils, nous avons cherché à reproduire les résultats reportés dans le projet PROMOVAN [2]. Les Tableau 6, Tableau 7, et Tableau 8 présentent la comparaison des sorties du projet PROMOVAN et ceux de l'outil HOT.

Tableau 6 : Ecart entre les résultats PROMOVAN [2] et nos outils pour architecture Promenade

Architecture de propulsion	PROMOVAN (L/h)	HOT (L/h)	Écart relatif
Thermique	17.1	17.5	2%
Thermique Amélioré	11.5	11.7	2%
Hydride Série	11.4	11.3	-1%
Hybride parallèle	10.5	10.6	1%
Hybride parallèle avec Changement moteur	10.0	9.9	-1%

Tableau 7 : Ecart entre les résultats PROMOVAN [2] et nos outils pour architecture Pousseur

Architecture de propulsion	PROMOVAN (L/h)	HOT (L/h)	Écart relatif
Thermique	144.8	156.8	8%
Hydride Série	156.3	163.1	4%
Hybride parallèle	145.8	157.0	7%
Hybride parallèle avec Changement moteur	137.6	146.6	6%

Tableau 8 : Ecart entre les résultats PROMOVAN [2] et nos outils pour architecture Automoteur

Architecture de propulsion	PROMOVAN (L/h)	HOT (L/h)	Écart relatif
Thermique	155.3	152.0	-2%
Hydride Série	175.4	159.8	-10%
Hybride parallèle	156.2	150.8	-4%
Hybride parallèle avec Changement moteur	152.2	146.4	-4%

De manière générale, les résultats des simulations sont proches de ceux observés par PROMOVAN [2]. Dans le cas de l'application Promenade, la différence est de 2% au maximum. Un maximum de différence de 10% peut être observé dans le cas de l'application « Automoteur ». Ces écarts peuvent principalement être expliqués par les potentielles différences de définition des cartographies énergétiques des moteurs thermiques utilisées (non-exploitation des mêmes cartographies de rendement des moteurs).

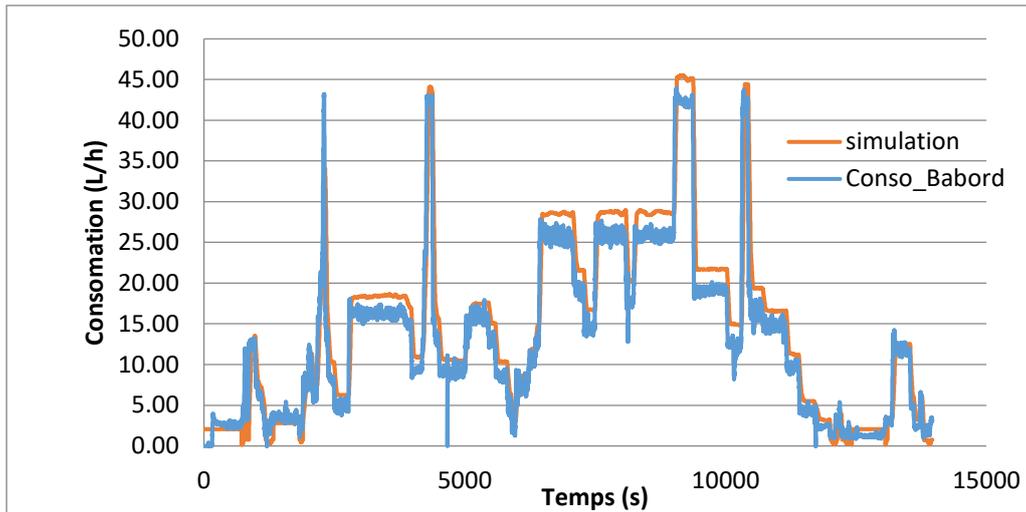


Figure 10 : Comparaison résultat de simulation et de donnée enregistré sur le bateau promenade

Une confrontation des résultats de simulation à des consommations mesurées en instantané (Figure 10) sur le bateau « promenade », présente un écart de l'ordre de 9% sur la consommation moyenne. L'écart reporté dans ce cas provient des approximations (dont la non prise en compte des transitoires) et du pré-traitement sur les données énergétiques retenues pour la modélisation. La comparaison des résultats en fonction du temps montre un bon niveau de représentativité du profil de consommation du bateau. Ces observations confortent ainsi le choix de la méthodologie d'estimation des consommations, d'autant plus qu'elle permet de les décliner pour l'ensemble des solutions de propulsion du périmètre de l'étude.

4.3 Hypothèse énergétique et projection

4.3.1 Vecteur Gazole Non Routier (GNR)

Les rendements pics des cartographies de consommation des moteurs thermiques GNR ont été établis à 42% pour l'horizon actuel. Cette valeur est jugée représentative de l'efficacité des moteurs équipant les bateaux de la flotte. On peut noter que des mesures internes IFPEN font état de rendements pics de l'ordre de 46% pour des moteurs de série « poids lourds » EuroVI. Le rapport PROMOVAN [2] fait quant à lui état de rendements pics constatés sur les bateaux instrumentés variant entre 36% et 45% selon les applications ; le rendement pic du moteur équipant l'automoteur a été estimé à 42% (moteur GNR de cylindrée 51.8l) comme l'illustre la Figure 11.

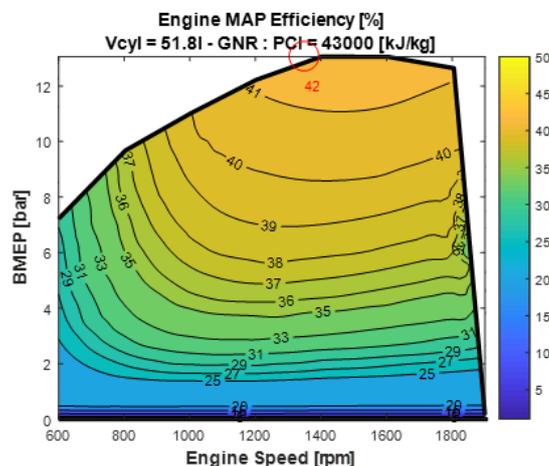


Figure 11 : Cartographie de rendement du moteur thermique équipant l'application « automoteur »

Des hypothèses de projection de l'évolution de ces rendements pour les horizons futurs sont considérées dans les modélisations. Nous supposons un gain de 10 points à l'horizon 2050, traduisant la pénétration progressive des évolutions des moteurs provenant du secteur « long routier ». Nous supposons une progression du rendement pic de 6 points jusqu'à 2035 suivie une progression de 4 points pour l'horizon 2050. Les rendements pics pour les moteurs thermiques Diesel sont rappelés dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Choix des rendements pics des moteurs Diesel pour les différents horizons de temps

Horizon	Actuel	2035	2050
Rendement max	42%	48%	52%

Ces hypothèses s'appuient sur les connaissances propres IFPEN concernant les roadmaps R&D, les réalités industrielles ainsi que la pénétration des technologies dans le secteur fluvial. A noter qu'un écart de 1 point de rendement maximum entraîne une variation de la consommation d'environ 2% sur l'ensemble des applications, d'après les résultats de simulations. D'autre part si les niveaux de rendement des moteurs évoluent pour les différents horizons de temps, la modification des formes et des positionnements des zones de rendements n'a pas été intégrée dans les modélisations.

4.3.2 Vecteurs alternatifs

Les vecteurs alternatifs XTL, B100 et biométhanol exploitent les mêmes cartographies de consommation que les moteur GNR correspondant (en termes de formes et de positionnement des contours « iso-rendement »). Les cartographies sont ensuite ajustées pour correspondre aux hypothèses suivantes :

- Par l'emploi de XTL, la littérature rapporte une amélioration du rendement entre 1.2-2.1 points par rapport au GNR [7]. Nous choisissons d'appliquer une amélioration de 1.5 points de rendement dans nos simulateurs.
- Par l'emploi de B100, la cartographie de consommation est ajustée afin d'avoir une surconsommation volumique de carburant de l'ordre de 6% par rapport à du GNR. Cette surconsommation de carburant pour le B100 malgré un rendement du moteur légèrement supérieur en présence de ce carburant est liée au PCI inférieur du B100 par rapport à celui du GNR [8]. A noter que l'emploi de B100 nécessite des adaptations sur le moteur thermique ainsi qu'une maintenance accrue afin de limiter les impacts de ce carburant tel que le colmatage des composants. La présente étude ne rend pas compte dans ses résultats des difficultés opérationnelles qui pourraient être rencontrées et dont VNF a eu certains retours.
- Par l'emploi de méthanol, la littérature indique des rendements de l'ordre de 38-40% pour l'horizon actuel [9–11]. Ces rendements sont relativement proches de ceux rencontrés pour les moteurs Diesel. Nous choisissons de faire évoluer les rendements de manière similaire au Diesel et ainsi atteindre un rendement pic de 52% à l'horizon 2050. Comme explicité précédemment pour le B100, les problématiques opérationnelles liées aux propriétés des carburants tel que le méthanol ne sont pas considérées dans la présente étude, mais mériterait d'être investiguées pour compléter les analyses.

Comme présentés précédemment dans le Tableau 5, les vecteurs alternatifs « hydrogène » et « gaz » sont basés sur des cartographies de consommation de moteurs réels fonctionnant respectivement à l'hydrogène et au gaz. Des adaptations par homothétie de ces cartographies permettent de couvrir l'ensemble des cylindrées et des applications modélisées. Les hypothèses de projection des rendements des moteurs « gaz » et « hydrogène » sont plus conservatrices que celles du moteur Diesel : on suppose des rendements 2050 pics des moteurs pour ces vecteurs atteignant 48%.

Le Tableau 10 résume les hypothèses retenues pour les densités énergétiques des différents vecteurs alternatifs et les écarts de rendement engendrés comparé au diesel (42%).

Tableau 10 : Hypothèses retenues pour le dimensionnement des cartographies de consommation des vecteurs énergétiques et écart de rendement comparé au diesel (42%) (horizon actuel)

Vecteur énergétique	LHV carburant (kJ/kg)	Ecart rendement maximum comparaison diesel (pts)
Diesel (GNR)	43000	-
Biocarburant (B100)	37000	+1.5 (+6% de consommation volumique)
XTL/HVO	44100	+1.5
Gaz	48000	-4
Hydrogène	120000	+2
Méthanol	19930	~0

4.3.3 Caractérisation des polluants locaux

4.3.3.1 Facteurs d'émission de polluants locaux pour le diesel GNR

Afin notamment d'alimenter l'analyse environnementale de l'étude, une estimation des émissions moyennes de polluants locaux pour les différents bateaux a été réalisée dans l'étude. Contrairement au calcul de la consommation énergétique, la « simulation système » n'a pas été retenue en raison de la complexité de la mise en place d'une telle modélisation, qui dépend d'un très grand nombre de paramètres (comme cela est décrit dans la partie dédiée du projet PROMOVAN [3]) dont :

- Modèle du moteur modélisé (cylindrée, injection, calibration...)
- Système post-traitement associé au moteur
- Norme d'homologation
- Age / temps exploitation du moteur thermique
- Famille de bateau / unité fluviale
- Usage, profil de mission et conditions de navigation

Concernant les normes des moteurs, le recensement CRMT rapporte la grande diversité des âges des moteurs sur la flotte du bassin Rhône-Saône. La Figure 12 illustre cette diversité au travers de la répartition des normes projetées par rapports aux âges des moteurs communiqués par 51 armateurs du bassin. On constate notamment que seuls 4 bateaux seraient susceptibles de respecter la dernière norme « Stage V » entrée en vigueur en 2019. Cette répartition n'est pas représentative du bassin car elle a été établie sur un faible nombre de bateaux du fait du faible nombre de retours collectés sur l'âge des moteurs lors du recensement (moins du quart de la flotte)

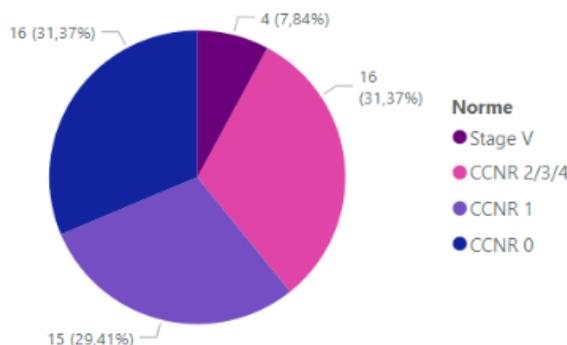


Figure 12 : Répartition des normes des moteurs pour 51 bateaux du bassin Rhone-Saone

Les facteurs d'émission de polluants locaux pour l'horizon actuel et le vecteur GNR ont été repris des travaux du rapport (ADEME, 2019)[12] dans lequel une revue bibliographique critique de l'ensemble des initiatives françaises et européennes de caractérisation de ces émissions des unités fluviales a été menée. Cette synthèse permet de rendre compte d'ordres de grandeur représentatifs des émissions des bateaux de la flotte française, en tenant compte notamment de la diversité des âges des moteurs de la flotte. Ces valeurs ne couvrent pas l'ensemble des applications de l'étude - des extrapolations ont été réalisées pour les familles de bateaux « pousseur urbain », « promenade » et « paquebot » - et ne sont pas spécifiques au bassin Rhône-Saône.

A l'horizon 2050, nous supposons une convergence des technologies de l'ensemble de la flotte « diesel » vers le respect de la norme Stage V. Le Tableau 11 recense les valeurs définies pour cette étude.

Tableau 11 : Facteurs d'émission retenus pour les horizons de temps actuel et 2050

Émissions échappement [g/kWh]	NO _x		PM		CO		HC	
	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050
Horizon								
Automoteur	8.43	1.8	0.255	0.02	1.505*	3.5	0.29	0.19
Pousseur de ligne	8.6	1.8	0.27	0.02	1.53*	3.5	0.3	0.19
Pousseur urbain	9.24	1.8	0.29	0.02	1.66*	3.5	0.33	0.19
Promenade**	9.77	4.7	0.30	0.14	1.72*	5	0.34*	4.7
Paquebot	8.74	1.8	0.27	0.02	1.53*	3.5	0.30	0.19

*Valeurs utilisées pour l'horizon 2050 aussi

**Valeurs considérées pour une puissance de propulsion supérieure à 130kW

Lors du recensement des facteurs d'émission, il peut se trouver que les émissions pour l'horizon actuel soient inférieures aux émissions du Stage V selon les polluants. Dans ce cas, nous supposons qu'il n'y aura pas d'émissions supérieures à l'horizon 2050 et que celles-ci seront similaires à celles de l'horizon actuel (Tableau 11). Les facteurs d'émission horizon 2035 sont interpolés entre les valeurs actuelles et celles de l'horizon 2050 suivant une répartition 40% horizon actuel et 60% horizon 2050.

4.3.3.2 Facteurs d'émissions de polluants locaux pour les vecteurs énergétiques alternatifs

La littérature et les communications présentent des gains relatifs pour les carburants alternatifs qui diffèrent selon les expérimentations et les unités fluviales. Pour rendre compte de la variabilité des conclusions, des fourchettes de tendances relatives au GNR ont été mises en place pour estimer les émissions des carburants alternatifs : B100, HVO/XTL, gaz, hydrogène et méthanol.

Ces fourchettes, illustrées en Figure 13, ont été établies sur la base d'une revue bibliographique, en particulier des communications portant sur des expérimentations récentes menées sur des unités fluviales. Parmi ces expérimentations, nous pouvons citer celles menées par :

- l'opérateur Scylla sur 4 de ses paquebots fluviaux avec le carburant GTL [7], constatant des réductions de NOx atteignant 25.5% et des réductions des particules en nombre atteignant 17.9%
- VNF et une instrumentation assurée par CRMT sur la vedette « Le Rhône » avec le carburant GTL [13] (2020), constatant des réductions de NOx atteignant 13%, mais des surémissions des particules en masse (PM)
- Sogestran et une instrumentation réalisée par le CERTAM, sur un automoteur avec le carburant B100 (2020), constatant notamment des surémissions de NOx atteignant 30% par rapport au GNR et des réductions des particules atteignant 75%. Constats sur le B100 partagés par la campagne de mesures menée par Martin Brower pour l'ADEME sur un camion MAN (EUROVI) [8]

Les informations obtenues dans les expérimentations fluviales listées ci-dessus ont été également complétées par celles relevées dans des rapports de projets européens, parmi lesquels nous pouvons citer les projets Prominent (dont le rapport *D 1.2* [14] qui établit dans la table 7 des fourchettes de réduction notamment pour le GTL et les motorisations « gaz ») et le projet Marigreen [15] qui donne des indications sur les niveaux d'émissions associés à la combustion de l'hydrogène (des niveaux de NOx potentiellement comparables à la combustion « Diesel » et des émissions de CO, HC et particules issues de la combustion de l'huile moteur significativement plus faibles). Ces indications sur la combustion hydrogène sont confortées par les retours des expérimentations de Keyou [6] et des premières observations menées sur les moyens expérimentaux IFPEN.

Les fourchettes des motorisations gaz s'appuient également sur la publication du TNO [16] qui présente l'avantage de s'intéresser spécifiquement au secteur fluvial, contrairement au projet Equilibre [17] qui s'intéresse aux émissions des camions, rendant ses conclusions de la comparaison gaz et Diesel non transposables aux besoins de l'étude en raison des différences importantes portant sur les cycles d'usage (sensiblement plus dynamiques dans le secteur long routier) et la présence de systèmes de post-traitement avancés (EUROVI) et massivement déployés par rapport aux applications fluviales. La publication TNO [16] renseigne également sur les émissions de méthane, significatives pour les motorisations « gaz » ; cet aspect est détaillé dans la section 6.3.3.11 *Emissions à l'échappement (phase « TTW »)*.

Enfin, les informations relatives à la combustion du méthanol sont inspirées des sorties des projets scandinaves GreenPilot [18] et Summeth [10] portant sur l'expérimentation de motorisations « méthanol » pour bateaux. Peu de données existent au sujet des émissions de CO et de HC pour ce vecteur, aucune surémission ou réduction des émissions pour ces espèces n'a été considérée.

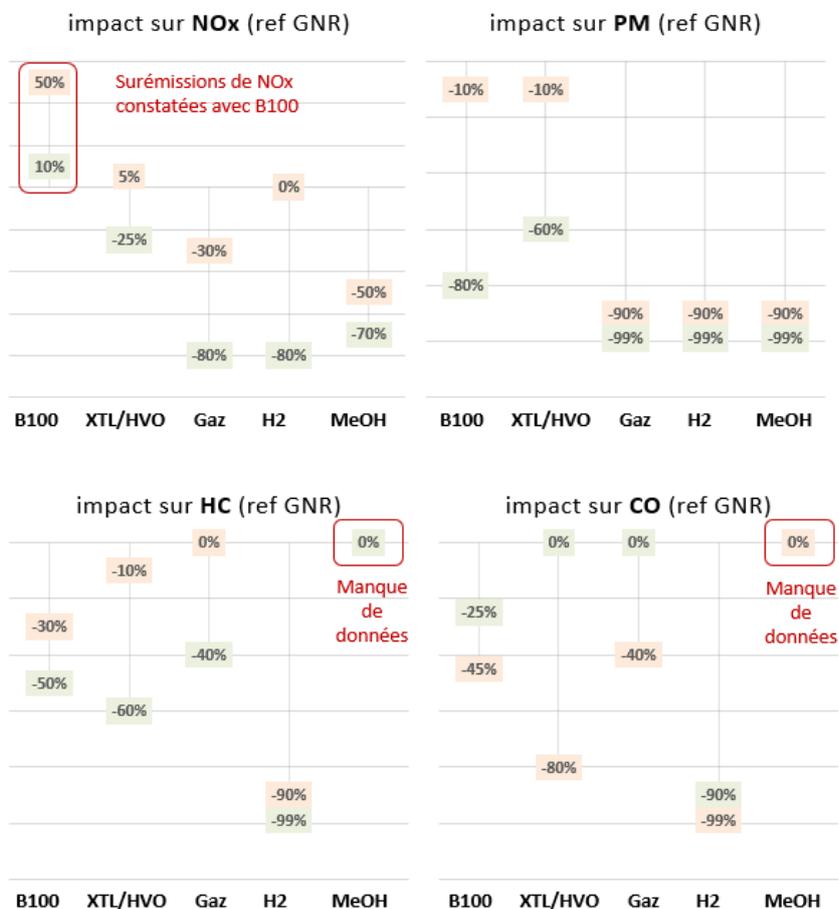


Figure 13 : Fourchettes de surémissions et de réductions des polluants locaux émis pour les carburants alternatifs par rapport à une référence GNR

4.3.4 Descriptions des architectures testées

Comme explicité en section 2, la modélisation des systèmes de propulsion porte sur 5 architectures : conventionnelle, hybride parallèle, hybride série, électrique à batterie et pile à combustible. La section suivante détaille la composition de ces architectures et leur modélisation au travers de l'outil HOT. Les consommations de bord ne sont pas traitées ici.

4.3.4.1 Architecture conventionnelle

L'architecture conventionnelle est l'architecture la plus simple, telle qu'illustrée en Figure 14. L'architecture conventionnelle est composée d'un moteur thermique (ICE) qui est lié à une hélice (VEH) via un réducteur (rd).

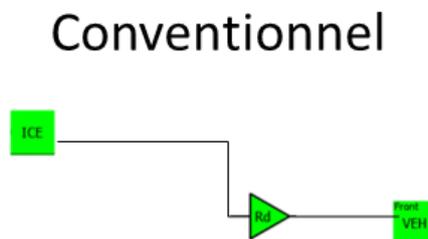


Figure 14 : Représentation de l'architecture conventionnel

La Figure 14 correspond à la représentation d'un seul arbre « hélice ». Lorsque l'application modélisée est composée de plusieurs arbres « hélice », nous supposons un fonctionnement symétrique des arbres ; la modélisation d'un seul groupe motopropulseur est effectuée. Les résultats de simulation sont alors cumulés selon le nombre de GMP équipant la famille de bateaux (tel que défini dans le Tableau 14, le Tableau 15, le Tableau 16, le Tableau 17 et le Tableau 18).

4.3.4.2 Architecture hybride parallèle

L'architecture hybride parallèle étudiée pour chaque famille de bateau est présentée par la Figure 15. Elle est constituée d'une chaîne de traction thermique et d'une chaîne de traction électrique comportant une machine électrique (MOT). Ces deux branches sont en parallèle, et fournissent la puissance à un arbre « hélice ».

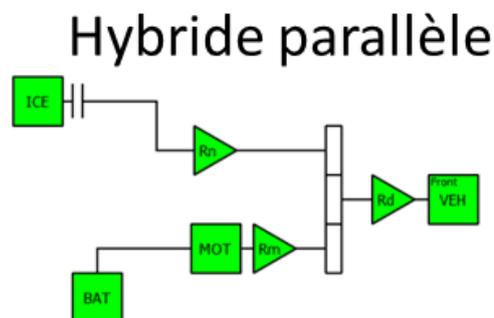


Figure 15 : Représentation de l'architecture hybride parallèle

Plusieurs modes de fonctionnement sont possibles en fonction des demande de puissances [2] :

- Le moteur thermique fournit exclusivement la puissance de propulsion et le moteur électrique est entraîné à vide
- Le moteur thermique fournit une puissance supérieure à la puissance nécessaire pour la propulsion et l'excédent de puissance est dérivé vers la batterie au travers de la machine électrique
- Les moteurs thermique et électrique délivrent simultanément de la puissance, notamment pour répondre aux fortes sollicitations
- Le moteur électrique fournit exclusivement la puissance de propulsion pour une navigation « tout-électrique » dont la durée est conditionnée par la capacité de la batterie.

Deux types de dimensionnement « hybride parallèle » sont considérés :

Cas Hybride parallèle sans changement du moteur thermique

Cette architecture illustre le scénario où le moteur thermique est conservé et une hybridation légère est apportée. Cette configuration permet de rendre compte de l'ajout d'un moteur électrique sur une architecture thermique existante. Le moteur électrique permet de lisser les fortes demandes de puissances et de limiter les utilisations dans les zones de mauvais rendement du moteur thermique. Dans la mesure où le moteur thermique est conservé, la puissance du moteur électrique sera relativement faible car la puissance peut être assurée entièrement par le moteur thermique.

Pour cette architecture, seuls les vecteurs énergétiques GNR, B100, XTL sont pris en compte. En effet, nous supposons que pour ces vecteurs, le moteur thermique conventionnel peut être gardé et adapté à ces vecteurs. Les vecteurs « hydrogène », méthanol et gaz impliquent potentiellement le changement du moteur, il semble donc judicieux d'optimiser la puissance du moteur thermique à la puissance du moteur électrique dans ces cas, selon le descriptif suivant.

Cas Hybride parallèle avec changement du moteur thermique

L'autre configuration « hybride parallèle » envisagée est celle avec le changement complet du groupe moteur propulseur. Le moteur thermique est remplacé par un moteur thermique de plus faible cylindrée (réduction de l'ordre de 30%) afin d'optimiser son fonctionnement. Le moteur électrique vient compléter le groupe propulseur afin de fournir la puissance maximale demandée par le cycle. L'optimisation des dimensionnements des machines thermiques et électriques a été établie dans le cadre du projet PROMOVAN [2].

4.3.4.3 Architecture hybride série

L'architecture « hybride série » est illustrée en Figure 16. Cette architecture met en jeu 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 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. Néanmoins, cette architecture peut être pénalisée par la cascade de rendement de l'ensemble de chaîne de propulsion : moteur électrique, génératrice et moteur thermique.

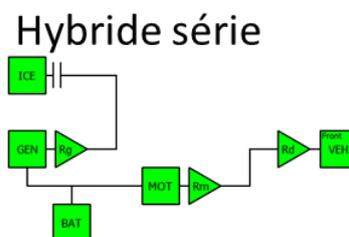


Figure 16 : Représentation de l'architecture hybride série

Pour l'architecture hybride série du cas « promenade », la configuration décrite dans le rapport PROMOVAN [2] est composée d'un groupe électrogène alimentant deux machines électriques de propulsion. La modélisation dans HOT considère une seule machine correspondant à la somme des deux machines décrites dans le rapport.

Une des architectures rencontrées notamment dans les applications « paquebot » est la configuration nommée « diesel-électrique ». Ce cas correspond à l'exploitation de plusieurs groupes électrogènes montés en parallèle alimentant un réseau de bord sur lequel des machines de propulsion électriques prélèvent la puissance. La modélisation de l'ensemble du réseau de bord (groupes électrogènes, consommateurs auxiliaires, stockeurs d'énergie et arbres « hélice »), et son optimisation énergétique étant complexes et incompatibles avec l'outil de modélisation retenu, le choix a ainsi été fait de raisonner sur une architecture « hybride série » connectée à un arbre « hélice ». Pour rappel le « paquebot » de référence pour l'étude est composée de 2 arbres « hélices ».

4.3.4.4 Architecture Pile à combustible

L'architecture « pile à combustible » (PAC) est similaire à l'architecture hybride série comme le montre la Figure 17. La pile à combustible (notée FC pour *Fuel Cell*) alimente en énergie le moteur électrique et à la batterie. La batterie associée à la pile à combustible permet ici encore de lisser les demandes de puissance à la PAC. D'autres architectures combinant pile à combustible et groupes électrogènes peuvent exister mais le manque de retours concernant leur gestion énergétique a conduit à ne retenir dans l'étude que la solution illustrée en Figure 17 : Représentation de l'architecture pile à combustible

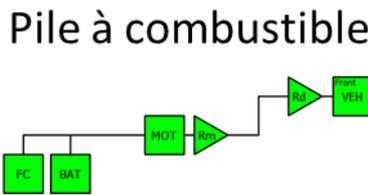


Figure 17 : Représentation de l'architecture pile à combustible

Afin de définir le dimensionnement des piles à combustible, un état de l'art des réalisations ou des projets de bateaux fluviaux « pile à combustible » a été mené [19–29]. La Figure 18 montre les dimensionnements rencontrés. La puissance PAC en fonction de la taille des moteurs électriques semble avoir une relation linéaire. Le dimensionnement de nos différentes familles de bateau se positionne sur cette courbe de tendance.

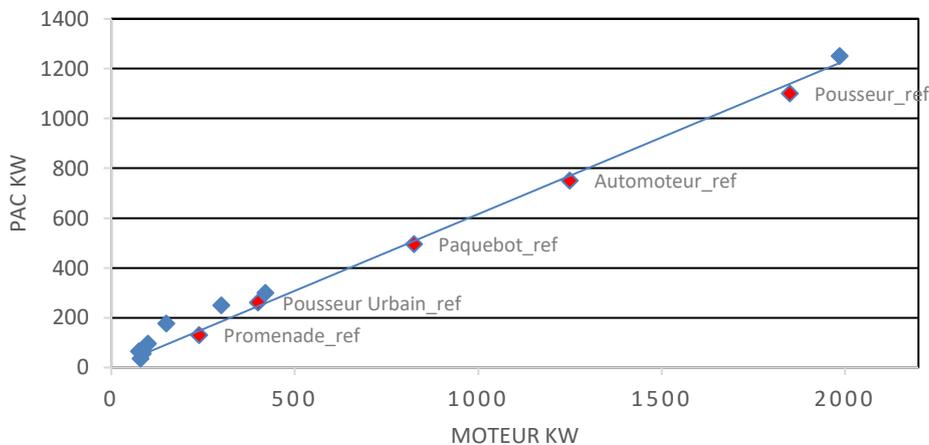


Figure 18 : Puissances maximales PAC en fonction de la puissance de propulsion embarquée pour différents projets de réalisation de bateaux alimentés par une PAC [19–29]

Dans le cadre de travaux réalisés en interne, IFPEN dispose de données expérimentales ayant conduit à la caractérisation d'un système « pile à combustible » fonctionnant à l'hydrogène et s'appuyant sur la technologie PEMFC pour un véhicule commercial [30]. Les modélisations énergétiques des différentes piles à combustible équipant les bateaux analysés dans cette étude s'appuient sur ces données expérimentales extrapolées pour correspondre aux différentes applications visées (Figure 19).

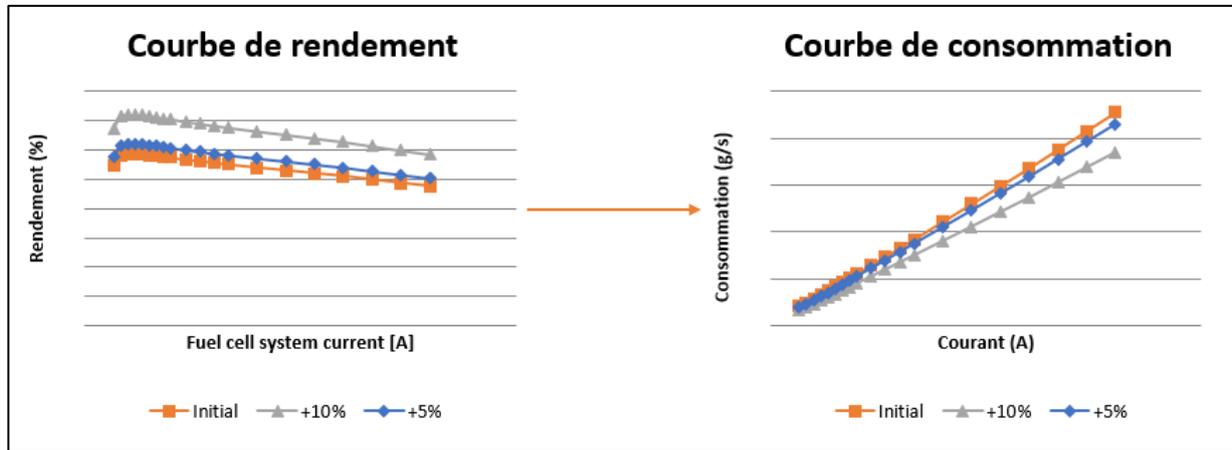


Figure 19 : Courbe de rendement et de consommation et ajustement à +5% et +10% de rendement

Les courbes de consommation sont recalculées à l'aide de l'équation (4-6) [30–32].

$$Consommation_{H_2} [kg_{H_2}/s] = \frac{Tension [V] * Courant[A]}{rendement_{syst_{PAC}} [\%] * PCI \left[\frac{kJ}{kg} \right] * 1000} \quad (4-6)$$

L'extrapolation consiste à translater la courbe de rendement initiale de La Figure 19, afin que le rendement pic de cette nouvelle courbe corresponde au rendement maximal souhaité selon l'horizon temporel considéré (voir Tableau 12 : Rendements pics retenus pour la modélisation des PAC « hydrogène »). La consommation est alors calculée à partir de cette nouvelle courbe de rendement via l'équation (4-6). L'adaptation de la consommation à d'autres carburants se fait en considérant le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du carburant souhaité (Tableau 10).

Le périmètre de l'étude retient deux vecteurs énergétiques pour l'alimentation des systèmes « pile à combustible » : l'hydrogène et le biométhanol.

Pile à combustible « hydrogène »

Parmi les différentes technologies de PAC disponibles, l'emploi de pile à combustible type PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) semble être la plus prometteuse dans le secteur du transport fluvial [24], notamment en raison de la maturité de cette technologie et de son déploiement pour les applications du secteur routier. Pour cette technologie, les rendements pics du système PAC indiqués dans la littérature pour l'horizon actuel se situent entre 50% et 66% [24,30,33]. Nous retenons dans les modélisations pour l'horizon actuel une valeur de rendement pic de 60%, en adéquation également avec les observations expérimentales menées à l'IFPEN.

Les projections des rendements pics des systèmes « pile à combustible » semblent atteindre un pallier pour l'horizon 2050 aux alentours de 70-75% [34–36]. Les piles possédant déjà un bon rendement, l'effort de recherche est concentré sur les auxiliaires de consommation liés au fonctionnement de la pile à combustible (compresseur, électronique de puissance, etc...) [36]. Les avancées auront alors un impact sur le rendement à puissance maximale de la pile et atténueront les pertes observées sur les puissances élevées. Néanmoins, ayant peu d'informations sur cet aspect, nous avons fait le choix d'appliquer les mêmes ajustements du rendement sur toute la plage de puissance. Nous fixons le rendement maximal à

l'horizon 2050 à 70% pour le système PAC de type PEMFC fonctionnant à l'hydrogène (hypothèse qui peut être jugée relativement optimiste). Nous supposons un gain de 6 points à l'horizon 2035, ce qui est en accord avec la littérature [35]. Il est à noter que la recherche fondamentale sur les piles semble axer les efforts sur l'amélioration de la durée de vie d'utilisation de la pile afin d'atteindre des durées de vie supérieures à 30 000 heures [36,37].

Le choix des rendements pour les différents horizons de temps est rappelé dans le Tableau 12.

Tableau 12 : Rendements pics retenus pour la modélisation des PAC « hydrogène »

Horizon	2020	2035	2050
Rendement pic (%)	60%	66%	70%

Pile à combustible « méthanol »

L'architecture « pile à combustible » fonctionnant au méthanol fait partie des solutions de propulsion envisageables, notamment pour pallier les inconvénients associés à l'utilisation de l'hydrogène (production et stockage).

Dans le cas de la pile à combustible méthanol, la technologie qui ressort est la technologie HT-PEM associée à un reformeur pour le domaine fluviat [22]. Les principaux avantages de ces systèmes PAC sont leur faible temps de démarrage et leur grande densité énergétique [38]. La Figure 20 montre de manière schématique les différents organes du système pile à combustible ainsi que le reformeur qui a pour fonction la génération de dihydrogène à partir du méthanol [39]. L'ajout d'un réformeur induit des pertes énergétiques : le rendement système se voit imputer d'environ 8 points par rapport à celui d'une pile à combustible « hydrogène » à l'horizon actuel [39–43].

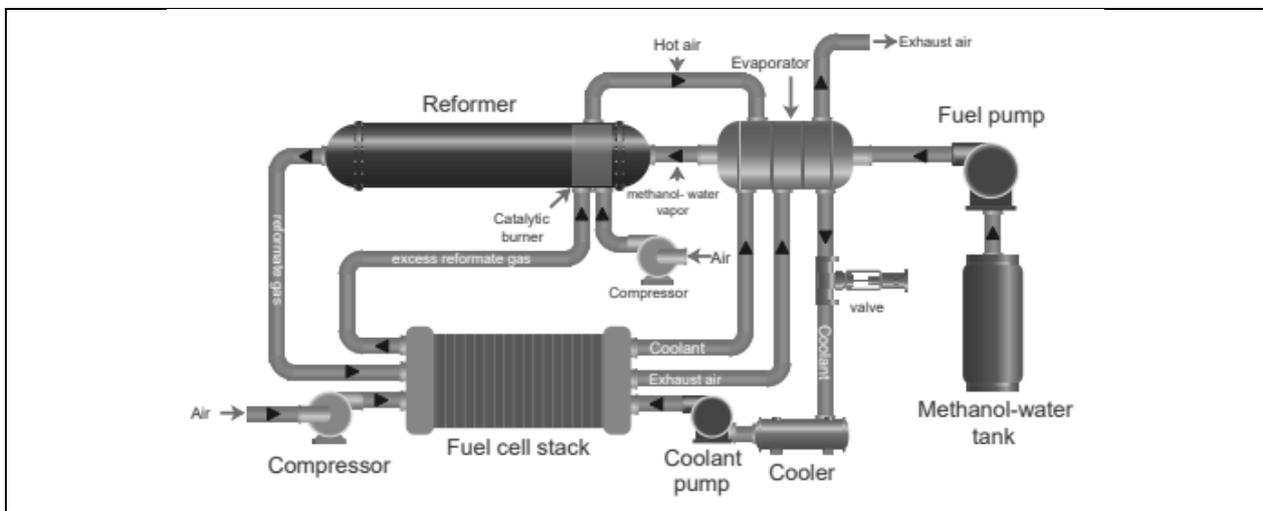


Figure 20 : Schémas de fonctionnement d'une pile à combustible alimenté par un reformeur Méthanol [39]

Les rendements énergétiques des systèmes PAC « méthanol » ont été établis à partir des données de la pile à combustible « hydrogène » en prenant en compte une perte de 8 points de rendement liée à la prise en compte du réformeur. Nous appliquons également cette même diminution des rendements pour les horizons 2035 et 2050. Cela a pour but de traduire les avancées technologiques possible dans ce domaine.

Les rendements systèmes sont donnés dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Rendements pics utilisés pour simuler les PAC méthanol

Horizon	2020	2035	2050
Rendement pic (%)	50%	58%	62%

4.3.4.5 Architecture électrique

L'architecture électrique est composée d'un moteur électrique directement alimenté par une batterie comme l'illustre la Figure 21. Les moteurs électriques sont de mêmes puissances que les moteurs thermiques des cas conventionnels correspondants afin d'assurer un profil de mission similaire. Pour rappel, cette architecture est retenue dans l'étude pour les applications « légères », i.e. « promenade » et « pousseur urbain ». Le dimensionnement de la batterie a été déterminé de façon à assurer une autonomie de 2 heures. Au vu des rendement déjà élevés des composants de la chaîne électrique, leur évolution énergétique selon les horizons de temps a été négligée.

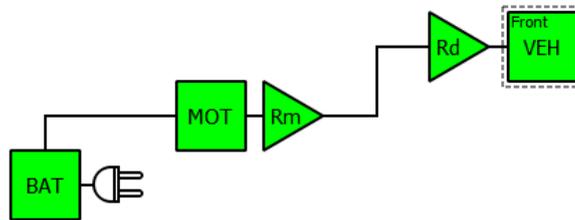


Figure 21 : Représentation de l'architecture électrique

4.4 Analyse des résultats énergétiques

Les résultats de simulation des différentes architectures étudiées pour les 5 familles de bateaux sont présentés dans cette partie. Les effets des architectures hybrides sur la consommation et les émissions seront analysés. Afin de faciliter la lecture, un « focus » détaillé sera fait sur le cas automoteur.

4.4.1 Famille Automoteur

Le Tableau 14 résume les dimensionnements retenus pour la famille automoteur. Ces dimensionnements ont été définis en s'appuyant sur l'étude paramétrique effectuée dans l'étude PROMOVAN [15]. La chaîne de propulsion de ce bateau correspond à un seul arbre d'hélice entraîné par un seul moteur thermique. La puissance de propulsion du bateau de référence est de 1250 kW ; les différentes architectures ont été dimensionnées en conservant cette puissance maximale de propulsion (à l'exception de l'architecture « hybride parallèle » avec conservation du moteur thermique de référence).

Tableau 14 : Dimensionnements des architectures de la famille « Automoteur »

Automoteur	MT (kW)	ME (kW)	GE (kW)	PaC (kW)	BAT (kWh)
Conventionnelle	1250	-	-	-	-
Hybride Série	750	1250	750	-	250
Hybride parallèle	1250	200	-	-	40
Hybride parallèle CM*	900	350	-	-	185
Pile à combustible	-	1250	-	750	250

*CM : Changement Moteur Thermique ; MT : Moteur Thermique ; ME : Moteur électrique ; GE : Génératrice ; PAC : Pile à combustible ; BAT : Batterie

Le fait de s’affranchir des contraintes de navigation – en raisonnant sur des profils de puissance moyens pour chaque famille de bateaux – ne nous permet pas d’ajuster la puissance moteur au plus près du besoin et il est fort à parier que compte tenu des rendements des ME comparativement aux rendements des MT, les puissances installées dans le cas des propulsions électrifiées seront inférieures – notamment au regard du constat de l’étude PROMO VAN [15] qui met en avant le surdimensionnement des bateaux par rapport à leur usage moyen . Le gain associé n’est donc pas calculé dans l’étude.

La Figure 22 présente les résultats de consommation pour la famille « automoteur ». Les résultats sont rapportés en kWh/h afin de permettre la comparaison des différents vecteurs.

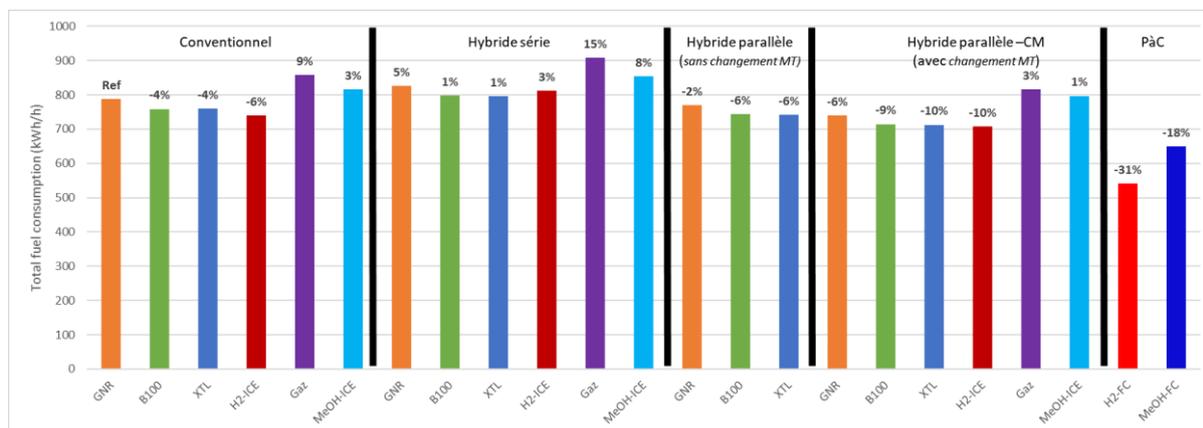


Figure 22 : Consommations énergétiques pour l’automoteur à l’horizon actuel

La Figure 23 se concentre sur l’intérêt énergétique des architectures hybrides. Les résultats de consommation, pour le vecteur diesel (GNR) et les différentes hybridations, sont représentés. A noter que les consommations pour les architectures électrifiées sont considérées à « bilan batterie nulle ».

Nous constatons qu’en fonction des architectures, l’impact peut être plus ou moins bénéfique. L’architecture « hybride série » présente une surconsommation de 5% comparée à l’architecture conventionnelle. Cette surconsommation, également observée dans le projet PROMO VAN [2], s’explique par la cascade de rendements des composants en série, non propice sur l’application et l’usage considérée. A noter que contrairement aux véhicules routiers, la récupération d’énergie lors des phases de diminution de la vitesse de navigation n’est pas possible. D’autre part, les profils de mission de pour ce type de bateaux comportent essentiellement de longues phases stabilisées. On rappelle également que cette architecture « série » n’inclut pas la prise en compte d’un réseau de bord ni d’une gestion à la demande du démarrage de plusieurs groupes électrogènes en parallèle et que cette dernière solution est potentiellement pertinente selon les applications à condition que l’optimisation énergétique de bord et le besoin énergétique soient correctement établis.

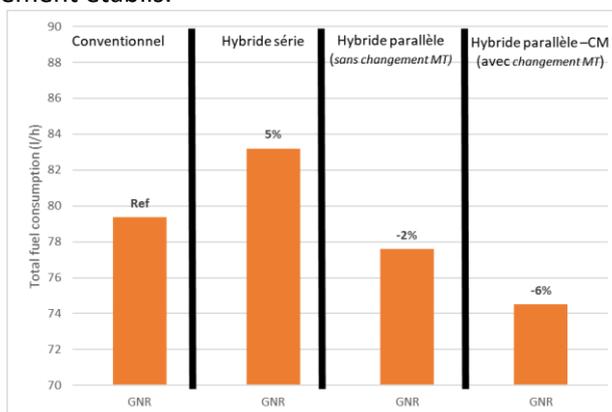


Figure 23 : Consommation énergétique pour l’automoteur à l’horizon actuel pour les différentes architectures étudiées

L'architecture « hybride parallèle » présente des gains de consommation via une meilleure exploitation du moteur thermique sur des points de fonctionnement de meilleur rendement. La Figure 24 rend compte de cet effet en illustrant la comparaison des sollicitations du moteur thermique. Nous pouvons constater que dans la partie basse de la cartographie (cercle blanc), les points de fonctionnement sont moins nombreux car la puissance de propulsion est alors assurée par la chaîne électrique à haut rendement en exploitant l'énergie stockée dans la batterie.

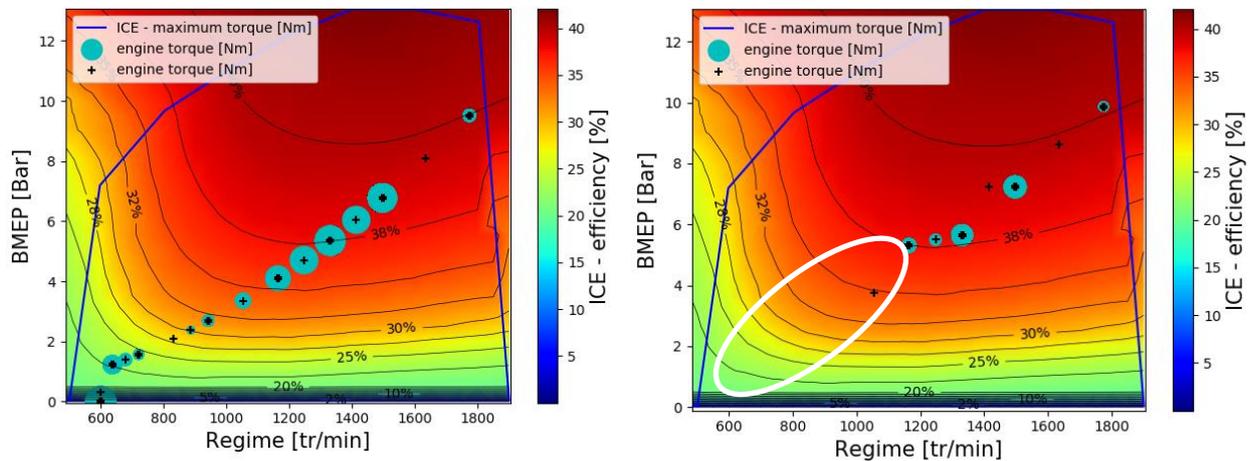


Figure 24 : Comparaison de l'utilisation du moteur thermique pour l'architecture conventionnelle (à gauche) et l'architecture « hybride parallèle » (à droite) sans remplacement de moteur thermique

Un autre « focus » est réalisé sur les différents vecteurs énergétiques. La Figure 25 présente les consommations pour l'architecture conventionnelle de l'ensemble des vecteurs énergétiques. Les vecteurs « gaz » et « méthanol » consomment plus que le cas GNR de référence. Ces surconsommations sont dues aux hypothèses sur les rendements énergétiques des motorisations associées. De fait, sur l'horizon actuel le moteur à combustion « hydrogène » est celui qui présente la consommation énergétique la plus basse en raison de la cartographie de rendement exploitée, inspirée des travaux et des publications de l'entreprise Keyou [6] – rendement pic de 44%.

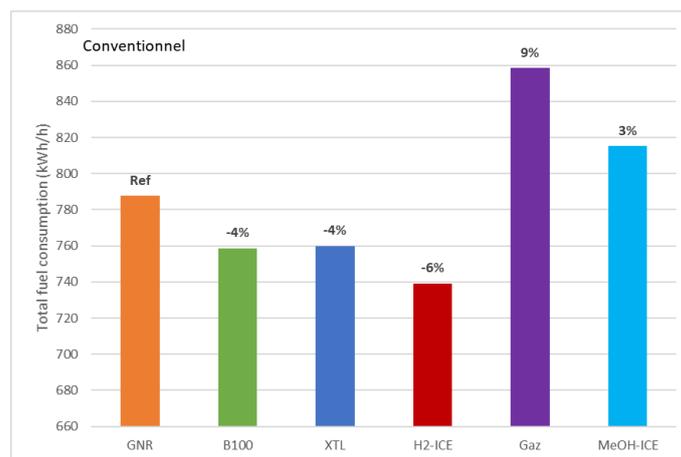


Figure 25 : Consommation énergétique pour l'automoteur à l'horizon actuel pour les différents vecteurs énergétiques étudiés

Cependant, les bons résultats énergétiques de l'hydrogène sont à confronter au volume qu'il pourrait occuper.

La

Figure 26 montre les volumes de carburant nécessaires afin d'assurer la même autonomie que le GNR (réservoir de référence établi à 33 m³). Les stockages sous formes comprimée et liquéfiée sont considérés pour les vecteurs « hydrogène » et « gaz ». Ces vecteurs peuvent notamment être jusqu'à 8,4 fois plus volumineux que le stockage de référence GNR. Dans le cas de l'utilisation d'une pile à combustible, nous retrouvons aussi des volumes plus importants que le GNR en raison de la densité énergétique des carburants hydrogène et méthanol. Ainsi, bien que possédant des meilleurs rendements que les motorisations diesel, les volumes nécessaires pour le fonctionnement d'une pile à combustible sur une même mission sont de 2 à 4 fois supérieurs. Un gain sur la masse de carburant transporté existe, mais il est potentiellement compensé par la masse des réservoirs ; la réduction de consommation associée n'a pas été étudiée car l'allègement est vraisemblablement négligeable par rapport au tonnage total du bateau.

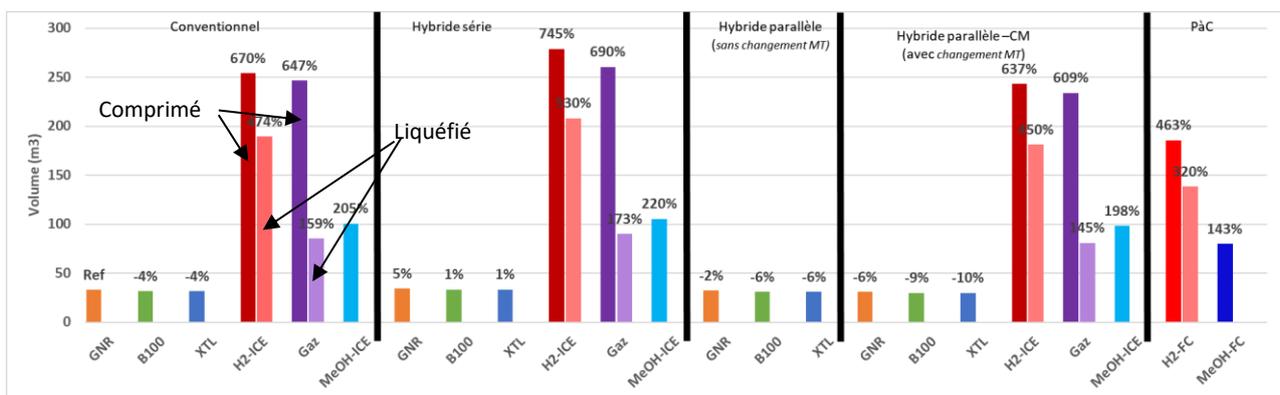


Figure 26 : Volumes de carburant nécessaires afin d'avoir une autonomie similaire au GNR muni d'un réservoir de 33 m³

La

Figure 27 montre les résultats de consommation énergétique pour les différents horizons de temps. Par rapport à l'horizon actuel, les diminutions sont de l'ordre de 12% à 14% pour l'horizon 2035 et de l'ordre de 15% à 23% pour l'horizon 2050. Ces diminutions sont la conséquence des hypothèses formulées sur les évolutions des rendements des convertisseurs énergétiques.

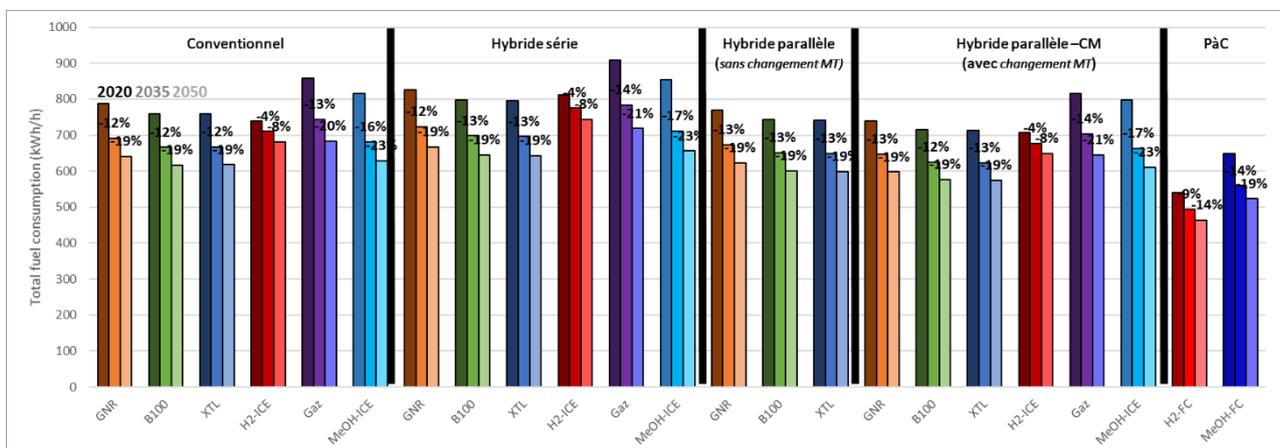


Figure 27 : Consommation énergétique pour l'automoteur à l'horizon actuel, 2035 et 2050 pour les différentes architectures étudiées

La

Figure 28 présente les résultats des émissions de NOx pour les architectures étudiées. Pour rappel, ces émissions sont calculées à partir des fourchettes de variabilité établies dans la section précédente. Pour un horizon de temps donné, les émissions les plus importantes sont observées pour le vecteur B100. Les émissions pour les vecteurs GNR, XTL, et hydrogène sont du même ordre de grandeur. Les émissions les plus basses sont obtenues pour les vecteurs gaz et méthanol dans le cas des motorisations thermiques. En raison de son fonctionnement, le bateau pile à combustion ne produit pas de NOx.

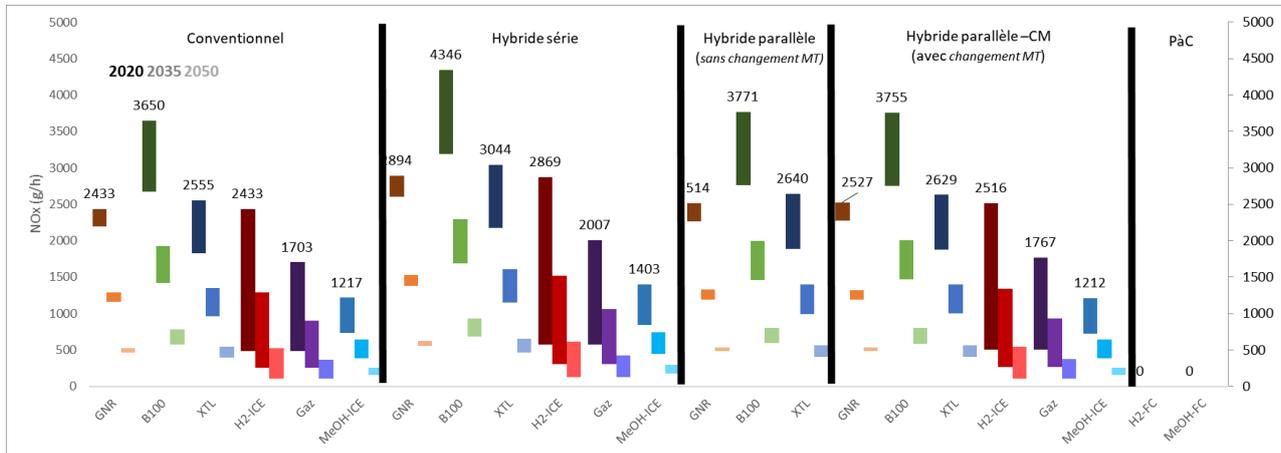


Figure 28 : Emissions de NOx pour l'automoteur à l'horizon actuel pour les différentes architectures étudiées

La

Figure 29 présente les résultats des émissions de particules pour les architectures étudiées. Pour un horizon de temps donné, les émissions les plus importantes sont observées pour le vecteur GNR. Les émissions pour les vecteurs GNR, B100 et XTL sont du même ordre de grandeur. Les émissions les plus basses sont obtenues pour les vecteurs hydrogène, gaz et méthanol dans le cas des motorisations thermiques. Les émissions sont divisées par 10 en comparaison au GNR par l'emploi de ces vecteurs. En raison de son fonctionnement, l'architecture PAC ne produit pas de particules.

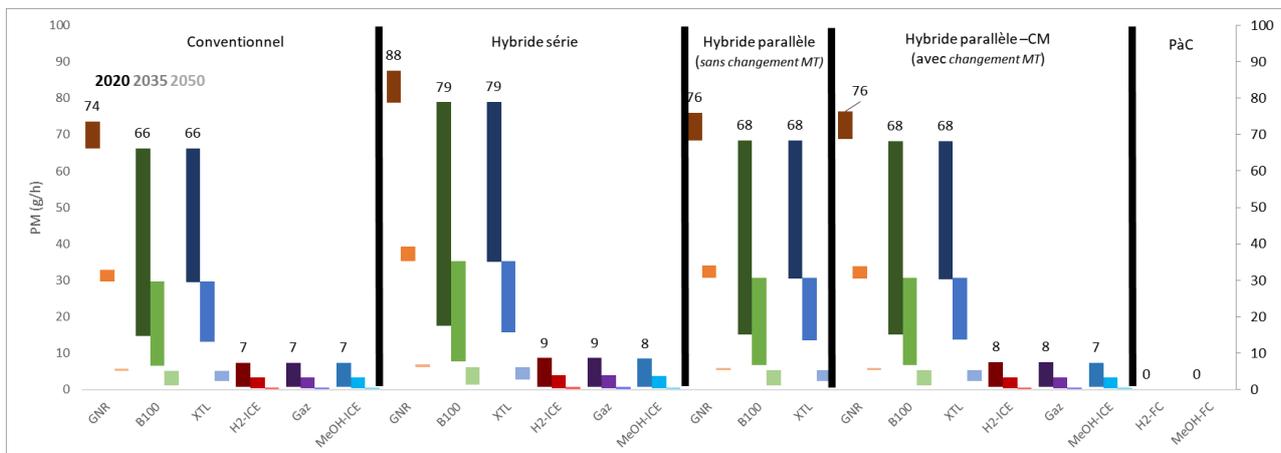


Figure 29 : Emissions de particule pour l'automoteur à l'horizon actuel pour les différentes architectures étudiées

La

Figure 30 présente les résultats des émissions de CO pour les architectures étudiées. Les fourchettes d'émissions sont les plus basses à l'horizon actuel. Nous avons alors supposé un facteur identique à l'horizon actuel pour l'horizon de temps 2050. Il n'y a donc pas de variation des émissions de CO pour les divers horizons. Les émissions de CO sont les plus basses pour le moteur hydrogène. En raison de son fonctionnement, le bateau pile à combustible ne produit pas de CO.

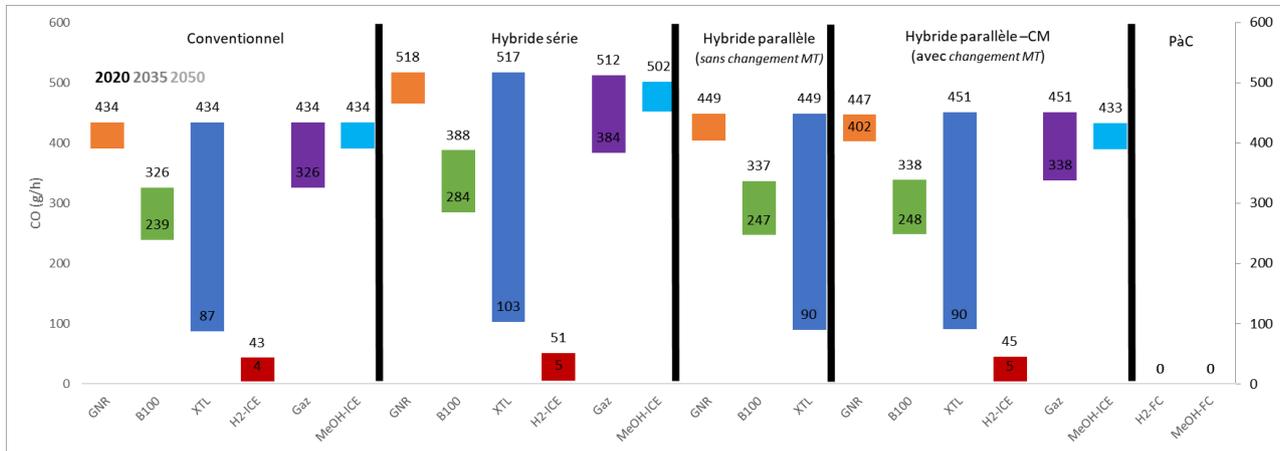


Figure 30 : Emissions de CO pour l'automoteur à l'horizon actuel pour les différentes architectures étudiées

La

Figure 31 présente les émissions d'hydrocarbures imbrulés. Les vecteurs GNR, B100, XTL, Gaz et méthanol montrent des niveaux d'émissions du même ordre de grandeur. Les émissions du moteur hydrogène sont là aussi les plus basses.

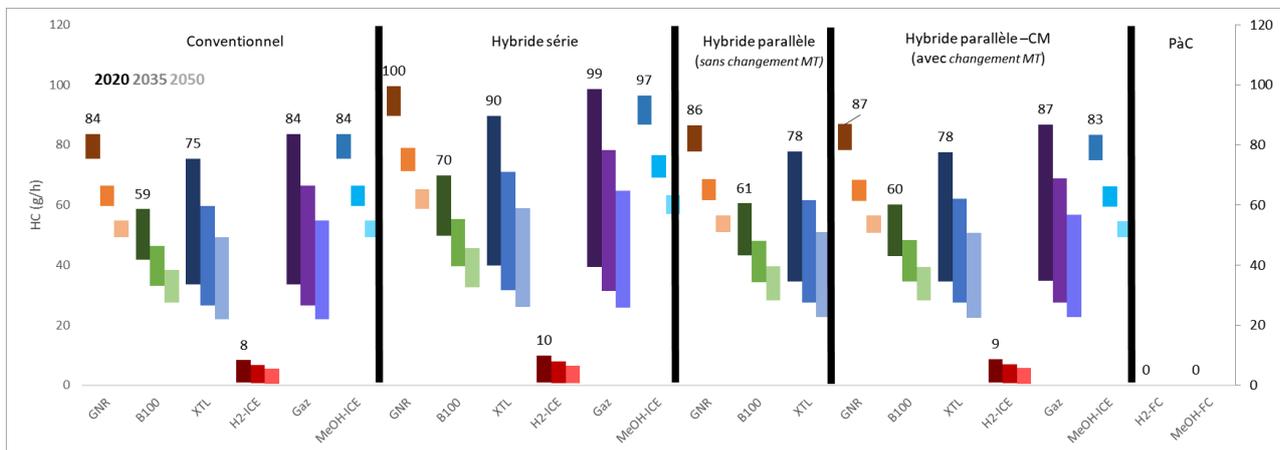


Figure 31 : Emissions de HC pour l'automoteur à l'horizon actuel pour les différentes architectures étudiées

Ces résultats portant sur l'estimation des polluants pour les différents vecteurs et architectures, ainsi que leur projection sur des horizons lointains sont à considérés avec précaution. En raison de l'incertitude sur les hypothèses employées, une campagne de mesure permettrait de valider ces différentes estimations sur l'horizon actuel. Ces estimations permettent toutefois de renseigner des ordres de grandeur, notamment pour l'analyse environnementale menée par la suite.

4.4.2 Autres Familles de bateaux

Les dimensionnements des autres familles de bateau sont rappelés dans les Tableau 15, Tableau 16, Tableau 17 et Tableau 18.

Tableau 15 : Dimensionnements des architectures de la famille « Promenade »

Promenade	MT (kW)	ME (kW)	GE (kW)	PAC (kW)	BAT (kWh)
Conventionnel	2*120	-	-	-	-
Hybride Série	130	2*120	130	-	35
Hybride parallèle	2*120	2*15	-	-	10
Hybride parallèle CM*	2*80	2*40	-	-	25
Pile à combustible	-	2*120	-	130	35
Electrique	-	2*120	-	-	70 (2h)

*CM : Changement Moteur Thermique ; MT : Moteur Thermique ; ME : Moteur électrique ; GE : Génératrice ; PAC : Pile à combustible ; BAT : Batterie

Tableau 16 : Dimensionnements des architectures de la famille « Paquebot »

Paquebot	MT (kW)	ME (kW)	GE (kW)	PAC (kW)	BAT (kWh)
Conventionnel	2*820	-	-	-	-
Hybride Série	2*495	2*825	2*495	-	225
Hybride parallèle	2*820	2*115	-	-	40
Hybride parallèle CM*	2*495	2*360	-	-	240
Pile à combustible	-	2*825	-	2*495	225

*CM : Changement Moteur Thermique ; MT : Moteur Thermique ; ME : Moteur électrique ; GE : Génératrice ; PAC : Pile à combustible ; BAT : Batterie

Tableau 17 : Dimensionnements des architectures de la famille « Pousseur »

Pousseur	MT (kW)	ME (kW)	GE (kW)	PAC (kW)	BAT (kWh)
Conventionnel	2*920	-	-	-	-
Hybride Série	2*550	2*920	2*550	-	250
Hybride parallèle	2*920	2*125	-	-	40
Hybride parallèle CM*	2*550	2*400	-	-	265
Pile à combustible	-	2*920	-	2*550	250

*CM : Changement Moteur Thermique ; MT : Moteur Thermique ; ME : Moteur électrique ; GE : Génératrice ; PAC : Pile à combustible ; BAT : Batterie

Tableau 18 : Dimensionnements des architectures de la famille « Pousseur urbain »

Pousseur Urbain	MT (kW)	ME (kW)	GE (kW)	PAC (kW)	BAT (kWh)
Conventionnel	400	-	-	-	-
Hybride Série	260	400	240	-	205
Hybride parallèle	400	100	-	-	20
Hybride parallèle CM*	300	200	-	-	70
Pile à combustible	-	400	-	240	205
Electrique	-	400	-	-	150 (2h)

*CM : Changement Moteur Thermique ; MT : Moteur Thermique ; ME : Moteur électrique ; GE : Génératrice ; PAC : Pile à combustible ; BAT : Batterie

Les tendances et les conclusions pour les familles Paquebot, Pousseur et Pousseur urbain sont similaires comme l'illustrent les

Figure 32,
Figure 33 et
Figure 34.

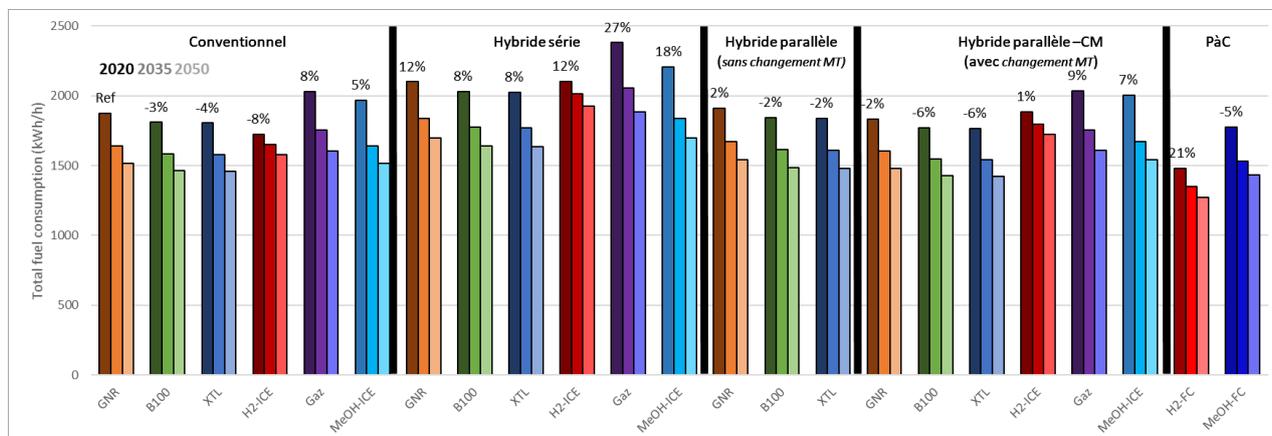


Figure 32 : Consommation énergétique à l'horizon actuel, 2035 et 2050 pour les différentes architectures étudiées pour la famille « Paquebot »

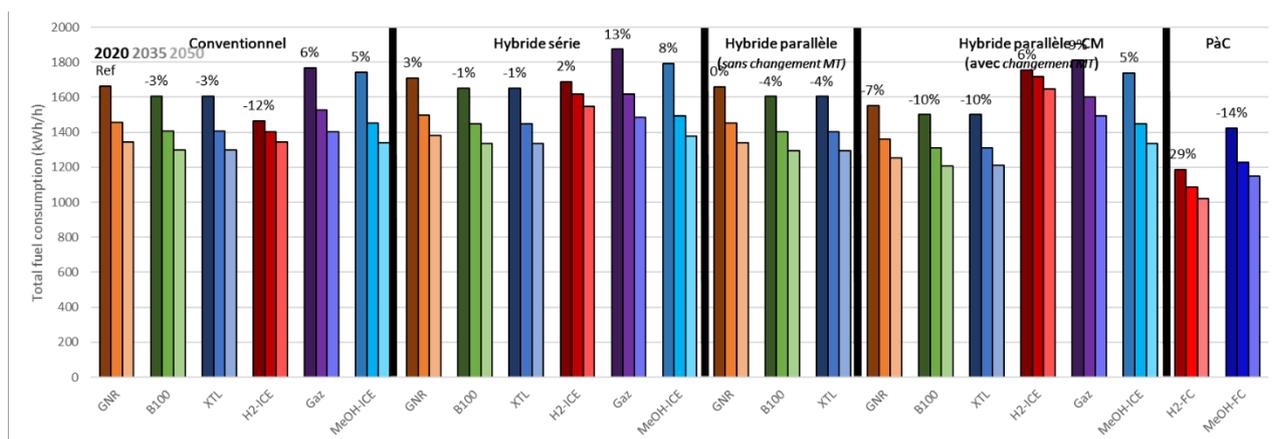


Figure 33 : Consommation énergétique à l'horizon actuel, 2035 et 2050 pour les différentes architectures étudiées pour la famille « Pousseur »

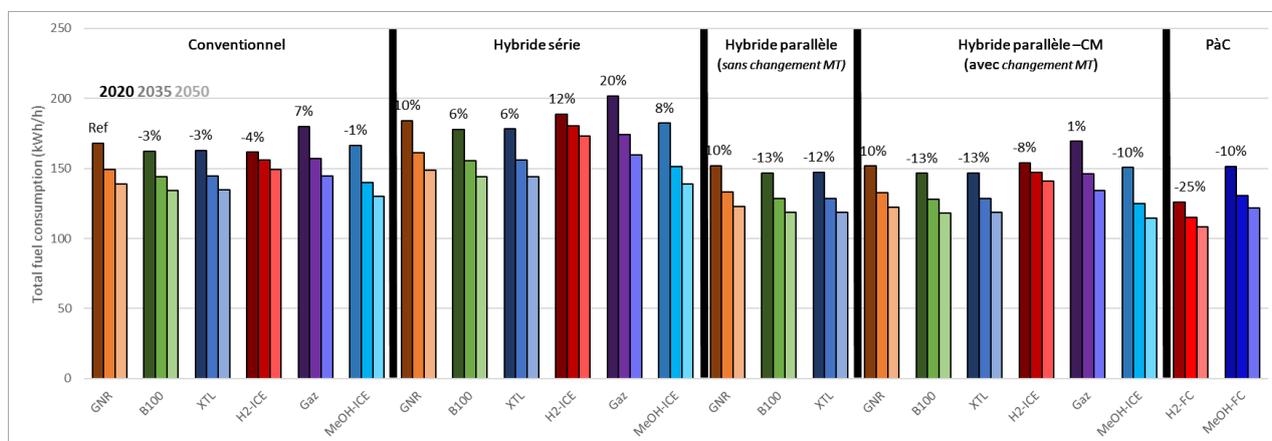


Figure 34 : Consommation énergétique à l'horizon actuel, 2035 et 2050 pour les différentes architectures étudiées pour la famille « Pousseur Urbain »

La

Figure 35 montre les résultats pour la famille de bateau « promenade ». Pour cette famille de bateau, nous constatons des réductions de consommation pour le cas « hybride série ». Cette diminution de la consommation est aussi rencontrée dans les résultats de l'étude PROMOVAN[2] pour l'application « promenade ». Le cycle d'usage moins sollicitant en termes de charges illustre l'intérêt de cette architecture pour ce type profil de mission.

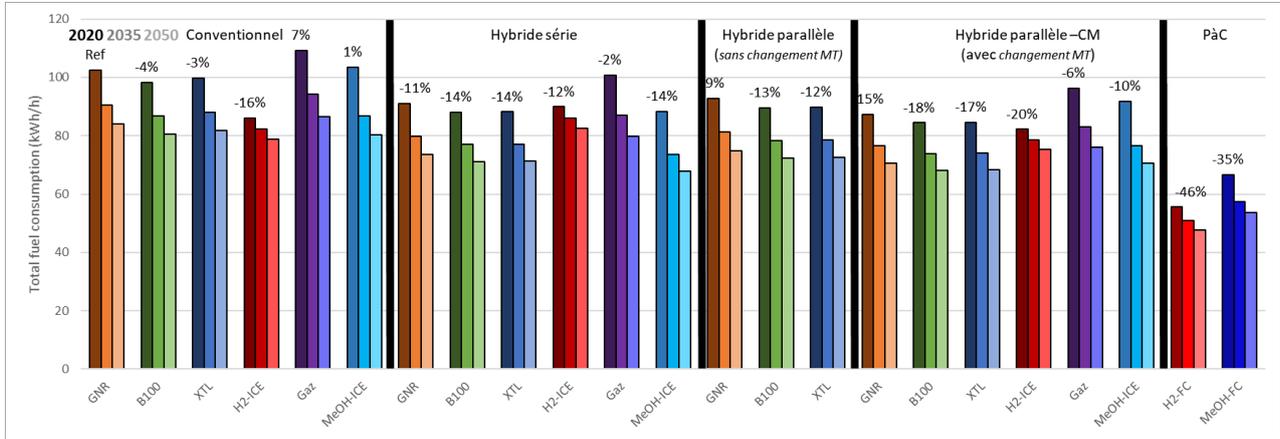


Figure 35 : Consommation énergétique à l'horizon actuel, 2035 et 2050 pour les différentes architectures étudiées pour la famille « Promenade »

4.4.3 Conclusion de l'analyse énergétique

L'analyse énergétique, menée au travers de la « simulation système », a permis d'établir les ordres de grandeur des consommations des différentes configurations architectures/vecteurs pour les usages identifiés en section 3. Cette méthodologie a permis également de projeter ces consommations via la prise en compte d'hypothèses sur l'évolution énergétique des systèmes. Ces éléments sont nécessaires pour les phases suivantes de l'étude : l'analyse technico-économique et l'analyse environnementale.

La comparaison énergétique a permis de dégager des tendances sur les consommations et les émissions de polluants locaux pour les familles de bateaux étudiées et les usages du bassin Rhône Saône.

Nous avons constaté que l'hybridation ne présente pas un intérêt énergétique aussi important que celui observé classiquement dans le secteur automobile. L'architecture pile à combustible est celle qui présente l'efficacité énergétique la plus élevée et des niveaux d'émissions de polluants locaux nuls. Concernant les moteurs thermiques, le vecteur hydrogène est le plus sobre tant au niveau des consommations que des émissions. Ces constats sont toutefois mitigés par les problématiques de stockage de l'hydrogène et des vecteurs « gaz », pouvant empiéter sur l'espace alloué à la marchandise transportée (considération non quantifiée dans l'étude, mais qui pourra l'être dans les suites de l'étude afin d'améliorer la méthodologie et la pertinence des scénarios). Enfin ces résultats caractérisent le périmètre « réservoir à l'hélice », ils sont à confronter aux conclusions issues de l'analyse cycle de vie des configurations.

4.5 Références de l'analyse énergétique

- [1] Stichting Projecten Binnenvaart. PROMINENT_D1 1-List-of-operational-profiles-and-fleet-families, 2016.
- [2] IFSTTAR / AME / LTE, DEROLLEPOT Romain. Rapport d'étude PROMOVAN, 2015.
- [3] IFSTTAR / AME / LTE, PILLOT Didier. Émissions de polluants des unités fluviales du projet PROMOVAN, 2015.
- [4] CEA, Roland RIOUX, Sébastien FIETTE. *Analyse énergétique et d'usage de bateaux de transport fluvial*. CEA, 2015, 86 p.
- [5] Step-by-step select and optimize your hybrid powertrain architecture. <https://community.sw.siemens.com/s/article/step-by-step-select-and-optimize-your-hybrid-powertrain-architecture>, consulté 26 avril 2022.
- [6] Koch D., Ebert T., Sousa A. Engine Adaptation from Diesel to H2 HP-EGR Lean Combustion Concept, *MTZ worldwide*, 2020, **81**, 5, 30-37. DOI: 10.1007/s38313-020-0223-9.
- [7] *Collaboration Project Green Luxury : Scylla*.
- [8] Martin Brower A. Mesures de performances environnementales sur un porteur MAN 26 tonnes EURO VI step C alimenté Mesures de performances environnementales sur un porteur MAN 26 tonnes EURO IV step C alimenté successivement en gazole et B100 en région lyonnaise, 2020.
- [9] The Methanolfuelled MAN B&W LGIM Engine.
- [10] Summeth. *Sustainable Marine Methanol : Final Report - Summary of the SUMMETH Project Activities and Results*, 2018, 34 p.
- [11] B. Ramne, J. Bomanson, P. Molander, J. Ellis, E. Errestad, H. Klintenberg. Final Report GreenPilot – Pilot Boat with Minimal Environmental Impact, 2018.
- [12] ADEME, VNF, AJBD. *Efficacité énergétique et environnementale du transport fluvial de marchandises et de personnes*, 2019.
- [13] CRMT, AZIZI, Yassine. CAMPAGNE DE MESURE DE POLLUTANTS AVEC TECHNOLOGIE PEMS SUR VEDETTE DU RHONE AVEC CARBURANT GTL, 2020.
- [14] VIA Donau. PROMINENT_D-1.2.-best-available-technologies_final, 2015.
- [15] Marigreen. *Perspectives for the use of hydrogen as fuel in inland shipping*, 123 p.
- [16] TNO, R. Verbeek, M. Verbeek. *LNG for trucks and ships: fact analysis LNG for trucks and ships: fact analysis Review of pollutant and GHG emissions Final*. TNO, 2015, 70 p.
- [17] projetEquilibre. Analyse des consommations et émissions de CO2 et NOx Analyse des consommations et émissions de CO2 et NOx sur des poids-lourds GNV et Diesel : Rapport complémentaire, 2018.
- [18] GreenPilot. *Pilot Boat with Minimal Environmental Impact*, 2018, 99 p.
- [19] Bassam A.M., Phillips A.B., Turnock S.R., Wilson P.A. Development of a multi-scheme energy management strategy for a hybrid fuel cell driven passenger ship, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, **42**, 1, 623-635. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.08.209.
- [20] FPS Maas Retrofit Project. <https://futureproofshipping.com/projects/the-maas/>, consulté 4 mai 2022.
- [21] Ballard receives PO from BEHALA for 3 x 100kW fuel cell modules to power German push boat. <https://www.greencarcongress.com/2019/10/20191003-ballard.html>, consulté 4 mai 2022.
- [22] Henning Joswig. Betriebserfahrungen mit dem Brennstoffzellenschiff auf dem Baldeneysee : 5. Fachkonferenz Elektromobilität vor Ort.
- [23] Prevljak N.H. ABB joins project to build world's 1st methanol-hydrogen fuel cell towboat, *Offshore Energy*, 2021.
- [24] Tronstad T., Åstrand H.H., Haugom G.P., Langfeldt L. Study on the use of fuel cells in shipping, *European Maritime Safety Agency*, 2017.
- [25] Wikipedia. Nemo H2. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nemo_H2&oldid=723935701, consulté 4 mai 2022.
- [26] Orion Naval Solutions. HyBarge : hydrogen fluvial motorized barge. https://orion-naval.solutions/project_automoteur-fluvial-h2/, consulté 4 mai 2022.

- [27] de-Troya J.J., Álvarez C., Fernández-Garrido C., Carral L. Analysing the possibilities of using fuel cells in ships, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, **41**, 4, 2853-2866. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.145.
- [28] Choi C.H., Yu S., Han I.-S., Kho B.-K., Kang D.-G., Lee H.Y., Seo M.-S., Kong J.-W., Kim G., Ahn J.-W., Park S.-K., Jang D.-W., Lee J.H., Kim M. Development and demonstration of PEM fuel-cell-battery hybrid system for propulsion of tourist boat, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, **41**, 5, 3591-3599. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.186.
- [29] Jo BROHAN. Navire Hylia #2 : Restitution des études d'Hylia. <https://www.bdi.fr/wp-content/uploads/2022/02/Presentation-restitution-des-etudes-Hylia-10-fev-22.pdf>, consulté 4 mai 2022.
- [30] Sery J., Leduc P. Fuel cell behavior and energy balance on board a Hyundai Nexu, *International Journal of Engine Research*, 2022, **23**, 5, 709-720. DOI: 10.1177/14680874211059046.
- [31] ZHAO Z., Du J., ZHAO H., XU D., QU L., WANG Y. A Simplified Fuel Cell Model for System Analysis and Performance Simulation. *IECON 2020 - 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 18/10/2020 - 21/10/2020, Singapore, Singapore. IEEE, 2020 - 2020, 4994-4999.
- [32] O'Hayre R., Cha S.-W., Colella W., Prinz F. B. *Fuel Cell Fundamentals*. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA, 2016.
- [33] Markowski J., Pielecha I. The potential of fuel cells as a drive source of maritime transport, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, **214**, 12019. DOI: 10.1088/1755-1315/214/1/012019.
- [34] Brooker A., Birky A., Reznicek E., Gonder J., Hunter C., Lustbader J., Zhang C., Sittler L., Yip A., Yang F., others. *Vehicle Technologies and Hydrogen and Fuel Cell Technologies Research and Development Programs Benefits Assessment Report for 2020*. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2021.
- [35] Behind the scenes: The 2020 Automotive Fuel Cell Roadmap. <https://www.apcuk.co.uk/behind-the-scenes-the-2020-automotive-fuel-cell-roadmap/>, consulté 4 mai 2022.
- [36] Jackson N. Fuel Cell Roadmap 2020 : Narrative Report, *Automotive Council*. https://www.apcuk.co.uk/app/uploads/2021/09/https___www.apcuk_.co_.uk_app_uploads_2021_02_Exec-summary-Technology-Roadmap-Fuel-Cells-final.pdf, 2021.
- [37] Kevin Colbow. Ballard's Commitment to Fuel Cell Technology Innovation—for 40 Years and Counting. <https://blog.ballard.com/ballard-fuel-cell-technology-innovation>, consulté 25 avril 2022.
- [38] Herdem M.S., Sinaki M.Y., Farhad S., Hamdullahpur F. An overview of the methanol reforming process: Comparison of fuels, catalysts, reformers, and systems, *International Journal of Energy Research*, 2019, **43**, 10, 5076-5105. DOI: 10.1002/er.4440.
- [39] Simon Araya S., Liso V., Cui X., Li N., Zhu J., Sahlin S.L., Jensen S.H., Nielsen M.P., Kær S.K. A Review of The Methanol Economy: The Fuel Cell Route, *Energies*, 2020, **13**, 3, 596. DOI: 10.3390/en13030596.
- [40] Tim Chan. Methanol Fuel Cells: Powering the Future. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/Methanol-Fuel-Cell-Powering-the-Future-webinar-presentation.pdf>.
- [41] Zhang J., Xiang Y., Lu S., Jiang S.P. High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells for Integrated Fuel Cell – Methanol Reformer Power Systems: A Critical Review, *Advanced Sustainable Systems*, 2018, **2**, 8-9, 1700184. DOI: 10.1002/adsu.201700184.
- [42] Lee H., Jung I., Roh G., Na Y., Kang H. Comparative Analysis of On-Board Methane and Methanol Reforming Systems Combined with HT-PEM Fuel Cell and CO₂ Capture/Liquefaction System for Hydrogen Fueled Ship Application, *Energies*, 2020, **13**, 1, 224. DOI: 10.3390/en13010224.
- [43] Ribeirinha P., Abdollahzadeh M., Pereira A., Relvas F., Boaventura M., Mendes A. High temperature PEM fuel cell integrated with a cellular membrane methanol steam reformer: Experimental and modelling, *Applied Energy*, 2018, **215**, 659-669. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.02.029.
- [44] Grzegorz Pawelec. *System-based solutions for H₂-fuelled water transport in North-West Europe : Comparative report on alternative fuels for ship propulsion*. Interreg North-West Europe, 2020, 85 p.
- [45] DST. *Assessment of technologies in view of zero-emission IWT*, 2021, 75 p.

- [46] Mobilité Hydrogène France. Quelles perspectives pour le poids lourd électrique à hydrogène pour le transport de marchandise?, 2022.
- [47] CCNR. *Etude sur le financemet de la transition énergétique vers un secteur du transport fluvial européen à zéro émissions*, 2020, 100 p.
- [48] Prominent. *D2.6 Ex-ante cost/benefit analysis of business cases for standard LNG configurations*, 2017, 68 p.
- [49] Multronic. *PROMINENT_D2.2_Ex-ante-cost-benefit-analysis-of-business-cases-for-standard-after-treatment-configurations*, 2015.
- [50] Stichting Projecten Binnenvaart. *Prominent_D2.6_Ex-ante_cost-benefit_analysis_of_business_cases_for_LNG*, 2017.
- [51] Communauté Portuaire de Paris. Synthèse : étude du groupe pilote : La transition écologique de la flotte parisienne, 2020.
- [52] IFPEN/ADEME. *Etude Energétique, Economique et Environnementale du Transport routier français à l'horizon 2040*, 2022.
- [53] IFEPN/ADEME. *Transports lourds fonctionnant à l'hydrogène*, 2022.
- [54] RTE. *Futurs énergétiques 2050 : L'analyse économique*, 2021.
- [55] PPE. *Stratégie française pour l'énergie et le climat : Programmation pluriannuelle de l'énergie*, 2019.
- [56] ENEA. *Overview of the biomethane sector in France*, 2017.
- [57] Kang S., Boshell F., Goeppert A., Prakash S. G., Landälv I., Saygin D. *Innovation outlook : Renewable methanol*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021, 122 p.
- [58] CCNR. *Déclaration de Mannheim*, 2018.

5 Comparaison technico-économique des solutions de propulsion

Le verdissement de la flotte fluviale sur le bassin Rhône-Saône répond à des contraintes écologiques de plus en plus pressantes, matérialisées par des objectifs de réduction des émissions de gaz à effets de serre dictés par la commission européenne aux horizons 2035 et 2050.

Mais de nombreuses solutions émergent avec la prétention de remplacer de façon durable les carburants fossiles pour le transport fluvial. L'analyse économique permet de discerner parmi ces solutions, lesquelles permettent de minimiser le coût économique de la transition, en fonction d'hypothèses étayées d'évolution des coûts des technologies et du prix des énergies.

L'ensemble des hypothèses est présenté ci-dessous et les résultats de l'analyse économique sont détaillés pour la famille de bateaux « automoteur ». Les résultats marquants pour les autres familles de bateaux sont ensuite évoqués, l'outil de calcul TCO (Coût Total de Possession) développé dans le cadre de l'étude permet d'étudier en détail les résultats de l'analyse pour chaque famille de bateaux aux différents horizons temporels.

5.1 Méthodologie de l'analyse économique

L'indicateur retenu pour cette analyse économique est le Coût Total de Possession ou TCO.

Le TCO permet d'agréger l'ensemble des coûts assumés par l'opérateur d'un bateau, de l'investissement initial à la dépense énergétique à chaque utilisation, sur l'ensemble de sa durée de vie. L'emploi du TCO est particulièrement pertinent dans ce contexte où les variations de dépense peuvent venir de différents postes de coût tels que la consommation d'énergie (passage du gazole aux énergies alternatives) ou l'investissement initial.

Les coûts liés à la main d'œuvre sont exclus du périmètre de l'étude, pour tous les types de bateaux étudiés. Concernant le prix des vecteurs, nous avons considéré un prix à la pompe ou à la prise pour l'utilisateur qui intègre CAPEX et OPEX. Nous n'avons pas quantifié l'effort d'investissement spécifique au bassin pour installer ces nouvelles infrastructures.

Enfin, la monétisation des externalités environnementales n'a pas été réalisée ici.

5.1.1 L'indicateur TCO

Le calcul économique s'effectue sur la vie du bateau, avant sa destruction, en quatre étapes successives (voir Figure 36).

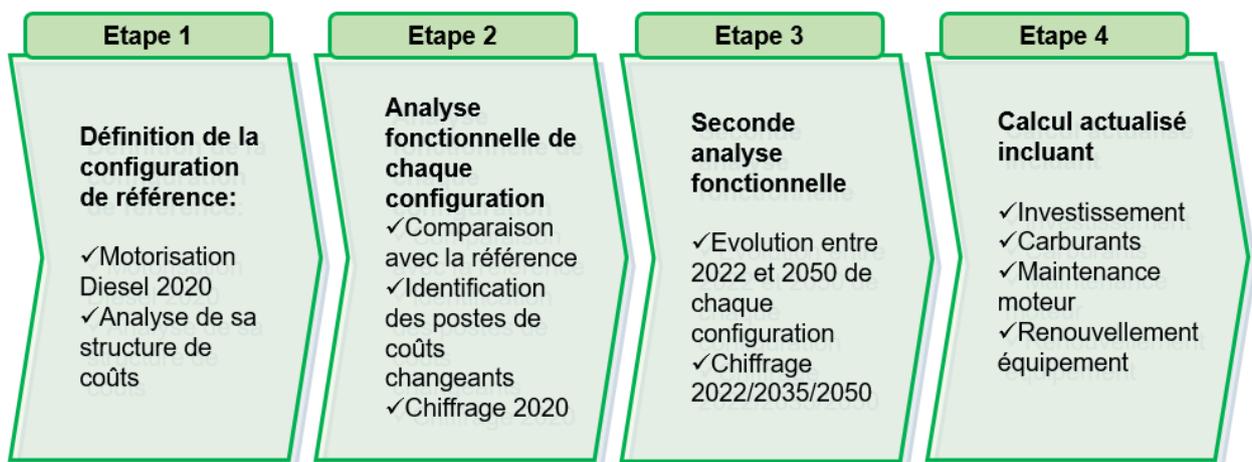


Figure 36 : Détail des étapes de calcul pour arriver au TCO

Etape 1 : Le point de départ est la configuration de référence, c'est-à-dire la motorisation thermique la plus répandue sur le bassin (comme explicité en section Périmètre de l'étude) pour laquelle les informations requises sont les plus disponibles. La motorisation thermique diesel, d'architecture conventionnelle, est la référence sur l'ensemble des familles de bateaux de cette étude, comme explicité dans la section 2 *Périmètre de l'étude*. Lorsqu'elle est disponible, la décomposition du prix d'achat des bateaux neufs permet de connaître les coûts des composants du groupe motopropulseur (GMP) ainsi que des éléments de structure du bateau (coque et commodités). Dans le cadre de cette étude, ces informations ont été obtenus pour les familles automoteur, pousseur urbain et pousseur de ligne. Pour les autres familles, l'évaluation du TCO est uniquement réalisée sur le périmètre du groupe motopropulseur, dans un contexte de rétrofit. Le rétrofit étant une solution souvent privilégiée sur une unité fluviale, cette approche reste pertinente.

Etape 2 : Les autres configurations (motorisations alternatives) sont étudiées une à une en observant les principales différences avec la configuration de référence (puissance, batterie, réservoir, etc...). On identifie ainsi les postes de coûts changeants et on établit un chiffrage pour l'horizon actuel.

Etape 3 : A partir d'un jeu d'hypothèses sur l'évolution des coûts des différents postes (batteries, pile à combustible), on prend en compte l'évolution des coûts annuels sur la durée de vie des bateaux (énergie, renouvellements). Notamment la baisse significative du coût de certaines énergies alternatives comme l'hydrogène ou le Biodiesel 2G est prise en compte dans le calcul du TCO. Ces variations de coûts entre 2022 et 2050 sont tirées de dire d'experts et de données issues de ressources bibliographiques sélectionnées. On peut citer, pour les éléments liés à la pile à combustible, l'étude H2Ships [44] ou DST [45] et pour l'évolution du prix de l'hydrogène, les travaux de France Hydrogène Mobilité [46].

Etape 4 : On effectue un calcul actualisé du TCO en intégrant l'ensemble des coûts liés à l'opération et la maintenance [47].

La dernière étape est le calcul du TCO, selon la formule suivante présentée en Figure 37.

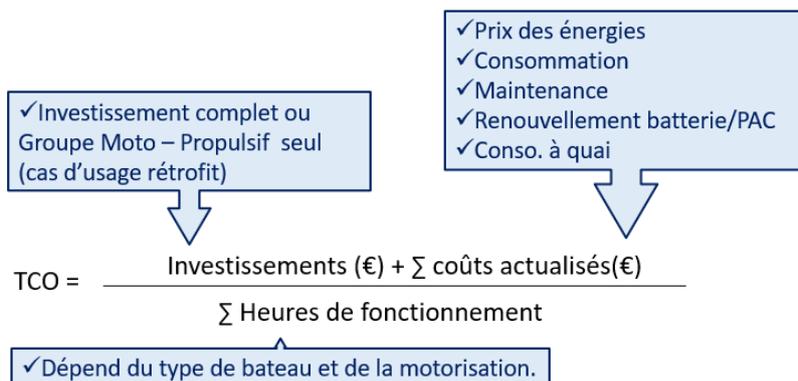


Figure 37 : Calcul du TCO

La consommation pour chaque configuration étudiée, à chaque pas de temps, est issue de la phase d'évaluation énergétique (voir section 4 *Modélisation énergétique des bateaux*).

Les durées de fonctionnement annuelles par famille de bateaux sont issues des travaux de recensement réalisés par la CRMT sur le bassin Rhône-Saône en 2020 (voir Tableau 3).

Le taux d'actualisation pour le calcul du TCO est fixé à 5%, hypothèse courante pour les projets d'investissements publics, et le taux d'inflation est choisi à 0 (calcul en euros constants).

5.1.2 Structure de coûts étudiée

Afin d'évaluer la valeur de l'investissement relative à chaque configuration de bateaux, une approche *bottom-up* (Figure 38) a été utilisée. Le coût des technologies spécifiques de chacun des bateaux a ainsi été ajouté au coût de la coque et des commodités lorsque les valeurs étaient disponibles (automoteur, pousseur de ligne et pousseur urbain). Les bateaux sur le bassin Rhône-Saône étant fréquemment « remotorisés », il est tout aussi pertinent de considérer uniquement le groupe motopropulseur pour le périmètre de l'étude, d'autant plus que c'est une analyse TCO comparative entre différentes architectures de propulsion et vecteurs énergétiques au sein d'une même famille de bateaux réalisant un service similaire ; inclure l'investissement lié à la coque ne fait que rajouter un off-set sur les indicateurs de comparaison et ne change donc pas la hiérarchie entre les solutions.

D'autres postes ont également été modélisés, comme le renouvellement des batteries électriques et des piles à combustible hydrogène et biométhanol, ou la consommation des bateaux à quai.

Les données utilisées pour établir cette décomposition des coûts proviennent de plusieurs sources [45], [48].

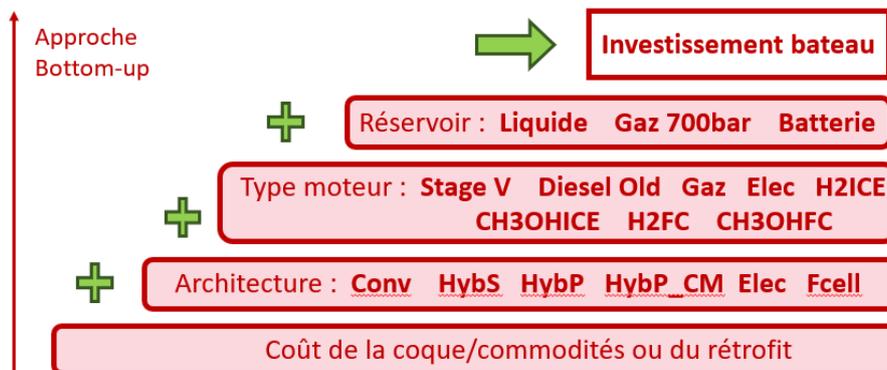


Figure 38 : Représentation de l'approche bottom-up utilisée pour déterminer le prix de vente des véhicules

5.1.3 Les cas d'étude

Les différents cas d'usage étudiés dans cette analyse TCO sont présentés par la matrice de la Figure 39.

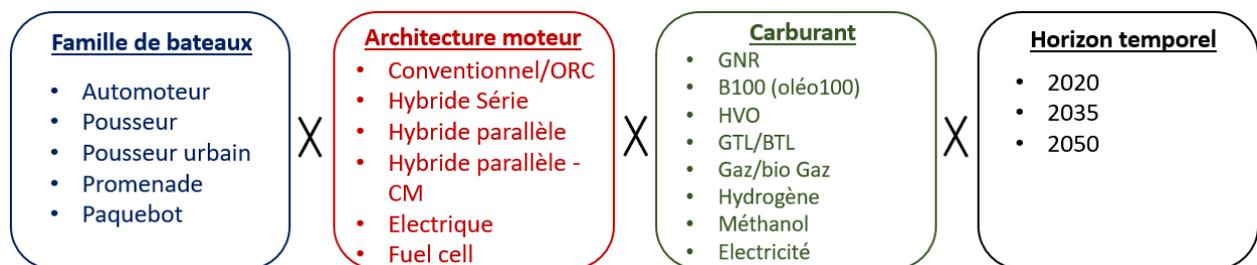


Figure 39 : Matrice des cas d'étude de l'analyse TCO

Une configuration correspond donc à une association {Famille de bateau x Architecture x Carburant x Horizon temporel}.

A quelques exceptions près, chaque configuration correspond à une simulation réalisée dans la phase énergétique à laquelle est associée une consommation horaire de carburant.

Concernant l'architecture ORC, qui est une architecture conventionnelle améliorée permettant de récupérer une partie de la chaleur à l'échappement afin d'améliorer la performance moteur, il est appliqué un coefficient (-6 à -8%)¹ à la consommation de l'architecture conventionnelle.

Les consommations des carburants de synthèse (HVO et XTL) sont considérées comme similaires pour une famille de bateaux et une architecture donnée (hypothèse de l'analyse énergétique justifiée par le fait que ces carburants sont similaires, de type paraffinique). De même pour le biogaz par rapport au gaz fossile. Pour des questions de faisabilité technique et d'intérêt global, certaines configurations ont été éliminées par avance : seul le pousseur urbain et l'application promenade sont étudiés en architecture toute électrique et seuls les carburants GNR, B100, GtL/BtL et HVO sont étudiés en architecture Hybride Parallèle sans changement moteur.

L'hydrogène et le biométhanol sont considérés dans l'ensemble des architectures thermiques ainsi que dans le cas d'une motorisation thermique à pile à combustible. L'ajout d'un reformeur de biométhanol à bord est pris en compte pour la configuration pile à combustible type méthanol (notée « CH3OH_Fcell » dans les outils)

5.1.4 Coûts liés l'investissement

5.1.4.1 Moteurs thermiques et électriques

Le coût des moteurs thermiques dépend essentiellement de leur puissance (exprimée en kW), du carburant utilisé mais aussi du niveau de technologie embarquée (turbocompresseur, système de post-traitement, réservoir associé...).

L'ensemble des coûts des différentes motorisations étudiées, aux trois horizons temporels, sont présentés dans le Tableau 19 : Coût des motorisations.

Tableau 19 : Coût des motorisations

Coûts des composants						
	2022		2035		2050	
Moteur Diesel Stage V	375	€/kW	375	€/kW	375	€/kW
Moteur Diesel Old	280	€/kW	280	€/kW	280	€/kW
Moteur gaz	450	€/kW	450	€/kW	450	€/kW
Moteur CH3OH	450	€/kW	450	€/kW	450	€/kW
Moteur hydrogène	618	€/kW	602	€/kW	570	€/kW
Pile à combustible H2	2500	€/kW	2200	€/kW	2000	€/kW
Pile à combustible CH3OH	3000	€/kW	2500	€/kW	2200	€/kW
Moteur DualFuel	255	€/kW	255	€/kW	255	€/kW
Moteur électrique	180	€/kW	180	€/kW	170	€/kW

Les coûts de l'ensemble des composants GMP sont issus principalement d'une actualisation des coûts utilisés dans les études DST [45] et Prominent [49,50], ainsi que dans les travaux de la CPP [51] .

Les configurations GNR sont associées à un moteur ancien (noté « Diesel Old » dans les outils) en 2022 puis à un moteur Stage V à partir de 2035, correspondant à l'évolution de la réglementation sur les émissions de polluants locaux sur le bassin.

Les biocarburants (B100, HVO), sont associés à un moteur « Diesel Old » sur tous les horizons temporels. C'est en phase avec la réglementation actuelle en France qui classe les véhicules routiers au B100 en « Crit'R 1 » pour la pollution locale. Etant donnée la réglementation actuelle, il a été fait le choix de ne pas considérer de système de post-traitement spécifique pour les configurations au Biodiesel. Cette hypothèse pourrait être discutée, mais elle a peu d'influence sur le TCO des solutions aux biocarburants.

En ce qui concerne le moteur électrique, la montée en force des véhicules électriques routiers s'accompagne d'une baisse de coût régulière qui devrait se répercuter sur le secteur fluvial.

¹ Chiffres issus de travaux en cours à IFPEN sur l'application ORC dans le domaine fluvial

5.1.4.2 Batterie et pile à combustible

Le coût des batteries est un aspect important du prix total des engins électrifiés. Les constructeurs font pour chaque type de transport un compromis entre une capacité de batterie élevée (et donc une autonomie importante) et un prix de vente raisonnable. Le secteur fluvial implique également des contraintes supplémentaires, notamment en termes de stabilité et d'encombrement. La question de la sécurité à bord est également pertinente bien que peu traitée à ce jour dans les études de faisabilité. Il est démontré que les progrès techniques de ces dernières années devraient encore se poursuivre et continuer à abaisser progressivement le coût des batteries d'ici 2050.

Le coût de la batterie utilisée dans cette étude est issu des travaux de la CPP [51]. On observe en comparant la littérature propre au fluvial à celle relative au transport routier une multiplication par 3 à 4 du coût batterie dans le fluvial. Cette différence importante, également observée pour les piles à combustible, s'explique d'une part par la complexité légèrement plus forte de la technologie pour supporter l'environnement fluvial, mais surtout par la faible taille du marché fluvial qui ne permet pas une baisse des coûts par l'industrialisation de la production.

Le coût complet regroupe un coût du pack batterie auquel s'ajoutent un coût lié à la gestion thermique, à l'électronique de puissance et un chargeur pour les configurations rechargeables. L'ensemble est récapitulé dans le Tableau 20.

Tableau 20 : Coût des éléments de la motorisation électrique

Coûts des composants						
	2022		2035		2050	
Batterie	600	€/kWh	546	€/kWh	520	€/kWh
Gestion Thermique Batterie	28	€/kWh	22	€/kWh	18	€/kWh
Chargeur électrique	400	€	400	€	400	€
Electronique de puissance FullElec	125	€/kW	125	€/kW	125	€/kW

Le coût de la pile à combustible est fonction de sa puissance, et dépend fortement de la filière de production, étant donnée la faible maturité industrielle de cet élément.

La littérature relative aux domaines du maritime et du fluvial fait état de coûts autour de 2500 €/kW pour une pile à combustible PEMFC² à hydrogène et 3000 €/kW pour la version méthanol (rajout d'un reformeur à bord) [44,45]. Ces valeurs sont bien supérieures à celles trouvées dans la littérature pour le transport routier (entre 300 et 900 €/kW) [46], ce qui peut s'expliquer par la très faible échelle du marché de la pile à combustible actuel, particulièrement pour le transport fluvial qui compte essentiellement des expérimentations « bateau pile à combustible ». Les valeurs retenues dans le cadre de cette étude sont celles spécifiques au fluvial. Le coût des piles à combustible décroît avec le temps pour atteindre 2000€/kW en 2050 pour l'hydrogène et 2200€/kW pour le Méthanol. Cette baisse est liée à une industrialisation des procédés de fabrication avec l'adoption croissante de ces solutions, tout en considérant la taille du marché fluvial dans son ensemble.

5.1.4.3 Réservoirs

Hormis les batteries, différents types de réservoirs sont considérés en fonction de la nature du carburant transporté.

Le réservoir liquide permet de transporter Diesel, biocarburants, XTL et méthanol, tandis que des réservoirs spécifiques permettent de transporter hydrogène et gaz à l'état liquide ou gazeux. Le coût des différents réservoirs est issu des études Marigreen pour l'hydrogène [15], Prominent pour le gaz [48,50], et E4T2040 [52] pour le réservoir liquide GNR.

Plus d'informations concernant les caractéristiques des réservoirs sont disponibles dans la section 6.3.2 de l'analyse environnementale.

² Proton-Exchange Membrane Fuel Cell, l'une des technologies de piles à combustibles les plus répandues sur le marché

5.1.4.4 Coque et rétrofit

Pour les architectures de bateaux de fret (automoteur, pousseur de ligne et pousseur urbain), des devis ont pu être récupérés auprès d'armateurs afin d'identifier des coûts spécifiques liés à la coque et aux commodités. Un rétrofit simple peut également être considéré en prenant uniquement en compte le coût de la main d'œuvre lié aux modifications du groupe motopropulseur.

Pour les bateaux de passagers (promenade et paquebot), seul le rétrofit est pris en compte.

Les coûts associés au rétrofit sont obtenus par la revue de différentes études, notamment celle de la CCNR [47], et est propre à chaque architecture et type de carburant.

Cependant l'étude manque à ce stade de retours d'expérience d'armateurs sur le bassin, notamment pour la valorisation des contraintes supplémentaires liées aux nouvelles motorisations (contraintes de sécurité telle que la nécessité que la salle des machines abritant des batteries permette l'extinction d'un départ de feu par exemple), donc l'évaluation du coût du rétrofit n'est que partielle. La contrainte liée à l'immobilisation – et la perte de revenus associée - des bateaux durant la remotorisation n'est pas non plus prise en compte.

5.1.5 Coûts d'opération

5.1.5.1 Coûts des énergies

Dans le calcul du TCO, la consommation de carburant (ou d'électricité) représente un poste très important. Il convient donc de faire des hypothèses sur le prix du litre de gazole, de biodiesel, du kilogramme de GNV ou d'hydrogène et sur le prix du MWh électrique de 2022 à 2050. L'évolution du prix des carburants fossiles à l'horizon 2050 prend en compte l'évolution du prix du pétrole brut et du gaz naturel, l'augmentation de la taxe carbone et le réaligement des fiscalités essence et gazole. Les prix sont considérés hors TVA. Toutes ces hypothèses sont cohérentes avec les études E4T2040 et TranpLHyn [53].

Les évolutions locales des prix des carburants fossiles, liées à des événements extérieurs peu prévisibles, ne peuvent pas être prises en compte dans une étude prospective au temps long comme celle-ci. L'outil d'analyse TCO développé dans l'étude et présenté en section 5.2 permet d'observer l'influence de tels scénarios extrêmes sur le TCO.

En ce qui concerne le prix de l'électricité, nous postulons une hausse d'ici 2050 pour atteindre un prix de 200 €/MWh. On rappelle qu'il s'agit ici du prix final correspondant à celui payé par l'utilisateur, et non de coût de production. Enfin, au sujet de l'hydrogène, l'analyse de plusieurs études donne un prix à la station autour de 4€/kg en 2050. On peut par exemple citer le tout récent rapport de RTE qui donne un prix de l'hydrogène vert à 3.6€/kg en 2050 [54].

Pour le bioGNV, il a été considéré un prix de 1,60 €/kg en 2020, ce qui correspond à son coût de production, transport et distribution actuel. La fiscalité favorable actuelle, facilitée par les Purchase Agreements, n'est pas prise en compte puisqu'elle est vouée à évoluer à l'horizon 2050, d'une manière difficilement prévisible.

Plusieurs études ont été utilisées afin de déterminer le prix à la pompe du bioGNV en 2050. On peut citer le document du Ministère sur la Programmation Pluriannuelle de l'Energie [55] ou un rapport d'ENEA [56]. Un coût de production de 60€/MWh en 2050 semble être un objectif, ce qui donnerait un prix à la pompe de 85€/MWh, soit 1.2€/kg.

L'évolution du coût des biocarburants est basée sur le prix actuel de l'Oléo100 pour le B100 et sur des projections d'évolution des coûts de production pour la 2G³.

Le méthanol considéré est du biométhanol, obtenu à partir de déchets agricoles. L'estimation de son coût est issue des travaux de l'IRENA [57].

³ Données interne IFPEN

Le coût des différentes sources d'énergie est présenté dans le Tableau 21.

Tableau 21: Prix des énergies aux horizons temporels de l'étude

Prix des énergies			
	2022	2035	2050
GNR (€/L)	0,87	1,41	1,79
B100 (€/L)	1,04	1,04	1,31
GTL (€/L)	0,94	1,32	1,68
BTL (€/L)	2,08	1,54	1,13
Hydrogène (€/kg)	10,00	6,33	4,01
Electricité (€/kWh)	0,13	0,17	0,20
GNC (€/kg)	0,78	1,10	1,40
Bio-GN (€/kg)	1,60	1,28	1,02
Methanol (€/l)	0,50	0,67	0,91
Bio-Methanol (€/l)	0,90	0,66	0,50
HVO (€/L)	1,00	1,19	1,20

5.1.5.2 Maintenance et consommations de bord

Les frais de maintenance sont annualisés et dépendent à la fois de l'architecture moteur (un moteur électrique nécessite moins de maintenance qu'un moteur thermique), du type de carburant (le biodiesel présente un risque d'encrassement plus important que le Diesel conventionnel, il nécessite plus de maintenance) et des heures de navigation annuelles.

La consommation d'énergie à bord du bateau lorsque celui-ci est à quai est également prise en compte dans l'analyse TCO.

Il a été considéré une puissance de générateurs à bord de 120 kW pour les paquebots et de 15 kW pour les autres familles, fonctionnant sur les heures de l'année où le bateau n'est pas en navigation. C'est une hypothèse assez grossière, qui pourrait facilement être affinée par des retours d'expérience d'armateurs dans de futures études. Cette hypothèse a peu d'influence sur les bateaux de marchandise qui passent la majorité du temps en navigation. En revanche pour les bateaux de passagers, et principalement les paquebots, la dépense liée à la consommation à quai représente une dépense importante qu'il serait intéressant de représenter plus précisément.

La consommation à quai est considérée comme étant assurée par des bornes électriques à partir de 2035, en adéquation avec l'ambition portée par VNF.

Le traitement des polluants locaux est pris en compte à partir de 2035 par un coût d'installation et d'entretien d'un système DPF + SCR [47].

5.2 Outil de calcul et de comparaison du TCO

La méthodologie présentée ci-dessous permet de comprendre la construction de l'indicateur TCO. L'ensemble de ces paramètres nourrit un outil Excel qui permet de visualiser et de comparer les différentes configurations.

L'utilisation la plus simple de l'outil permet de visualiser en quelques clics les configurations intéressantes via le calcul et la comparaison des TCO des solutions de propulsion. La Figure 40 illustre le rendu de cet outil simple développé dans le cadre de l'étude.

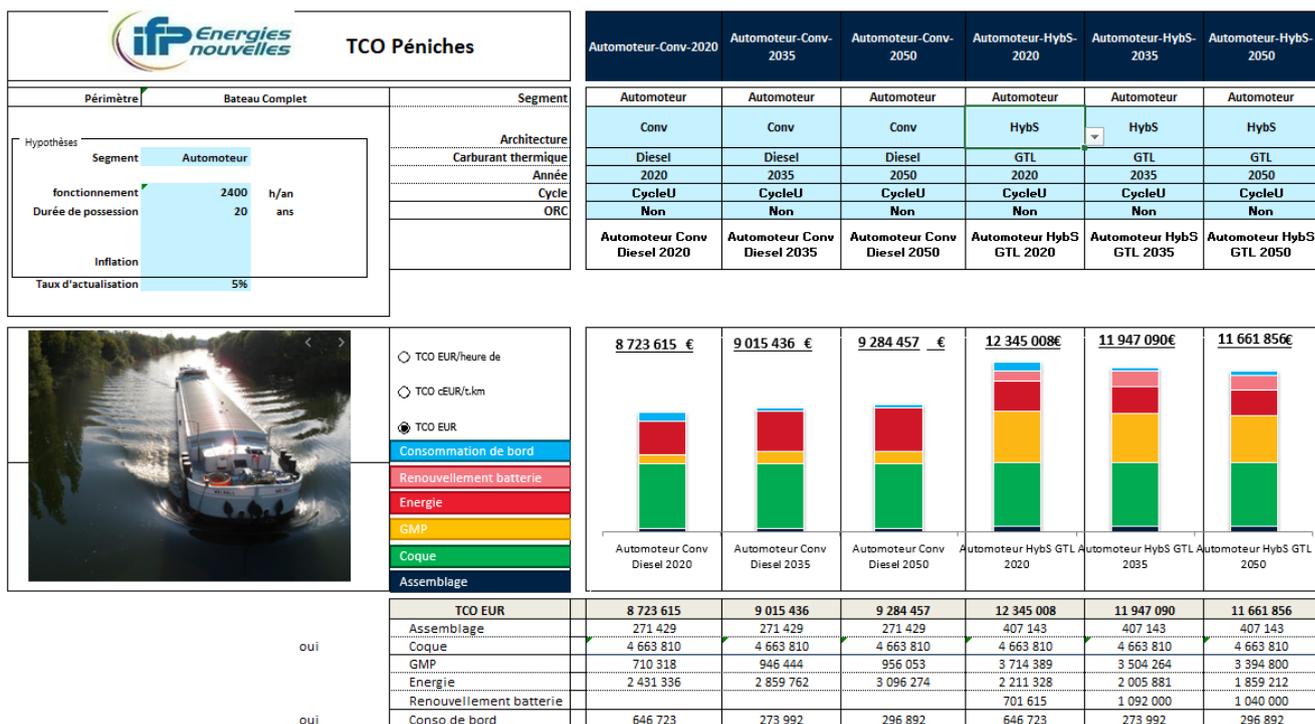


Figure 40 : Interface utilisateur de l'outil TCO

Toutes les cases bleues peuvent être modifiées par l'utilisateur. Celui-ci peut ainsi choisir la famille de bateaux, la durée de possession et les heures annuelles de fonctionnement, ainsi que les paramètres économiques tels que l'inflation et le taux d'actualisation. L'utilisateur peut ensuite définir les configurations qu'il souhaite visualiser, en choisissant « architecture », « carburant » et « année de référence ». Le TCO peut être visualisé en absolu ou ramené à l'heure de fonctionnement ou à la tonne kilomètre transportée.

5.3 Comparaison des solutions alternatives

Pour les différentes familles de bateaux, trois types d'influences peuvent être analysées : l'influence du changement d'architecture, celle du passage à un carburant alternatif, et celle de l'évolution temporelle qui permet d'observer si une solution peut devenir intéressante dans un futur plus ou moins proche.

L'objet de ce rapport n'est pas de fournir une analyse exhaustive pour chaque configuration, mais simplement de développer un cas d'étude, celui de l'application « automoteur », et de mettre en lumière certaines analyses intéressantes pour le « verdissement » de la flotte à l'horizon 2050. Les visuels comparatifs pour les autres familles de bateaux sont disponibles sur les diapositives de synthèse et peuvent être facilement générés via l'outil TCO.

L'automoteur 110m est étudié sur le périmètre complet (achat du bateau complet, pas uniquement retrofit) pour un fonctionnement annuel de 2400 heures et une durée de vie moteur de 20 ans.

Une première comparaison peut se faire sur la base du carburant, aux différents horizons temporels, pour une architecture conventionnelle.

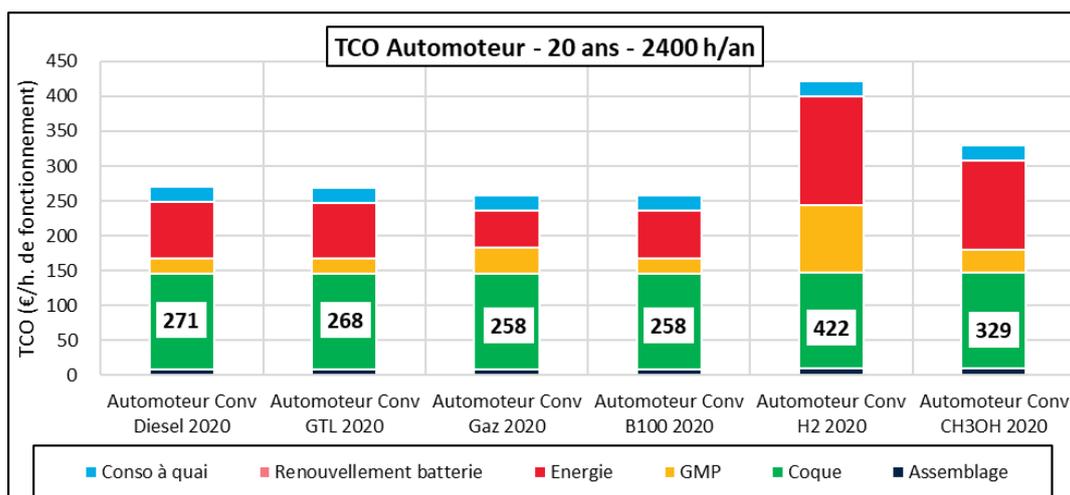


Figure 41 : Evolution du TCO de l'automoteur en fonction du carburant, référence 2020

La Figure 41 présente le TCO de l'automoteur d'architecture conventionnelle en 2020, pour les différents carburants présents à cet horizon. Le gaz est d'origine fossile, l'hydrogène et le biométhanol sont renouvelables.

On constate dans un premier temps qu'aucune solution ne s'illustre par un TCO particulièrement faible. Le GNR est parmi les solutions les moins chères, avec une structure de TCO très similaire au B100 et au GtL. La solution gaz entraîne un surcoût lié au GMP (moteur plus cher), qui est compensé par une dépense énergétique plus faible, ce qui l'amène au même niveau que les autres carburants liquides. Le biométhanol est légèrement plus cher en raison d'une part du coup du moteur mais surtout car la dépense énergétique est plus élevée.

Quant à la solution à hydrogène, son TCO est deux fois plus élevé que la référence au GNR, en raison d'une part du surcoût du GMP (réservoir en fibre de carbone très onéreux [45]) mais également de la dépense énergétique (hydrogène à 10€/kg en 2022).

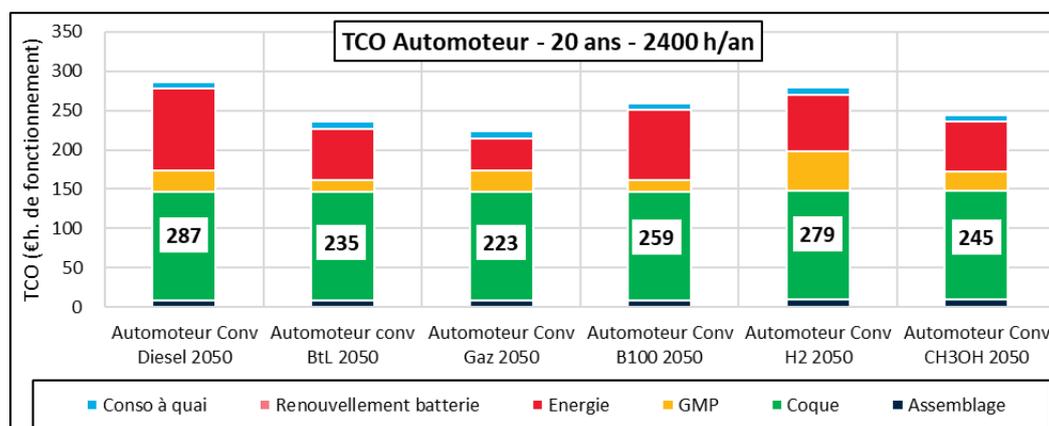


Figure 42 : Evolution du TCO de l'automoteur en fonction du carburant, référence 2050

La

Figure 42 présente les résultats pour la même architecture moteur en 2050. Le GNR est désormais parmi les solutions au TCO le plus élevé, légèrement plus haut que l'hydrogène qui bénéficie de la baisse du coût de l'énergie (H2 à 4€/kg) et des briques technologies (baisse du coût du réservoir) pour devenir compétitif. Les solutions fonctionnant aux carburants d'origine biologique sont les plus intéressantes à l'horizon 2050 puisqu'elles bénéficient d'un coût de l'énergie relativement faible grâce à la maturité des procédés industriels, et d'un investissement faible (moteur Diesel d'ancienne génération). En revanche la question de la disponibilité de la matière première permettant de produire ces biocarburants de deuxième génération n'est pas posée ici mais pourrait limiter le déploiement de ces solutions.

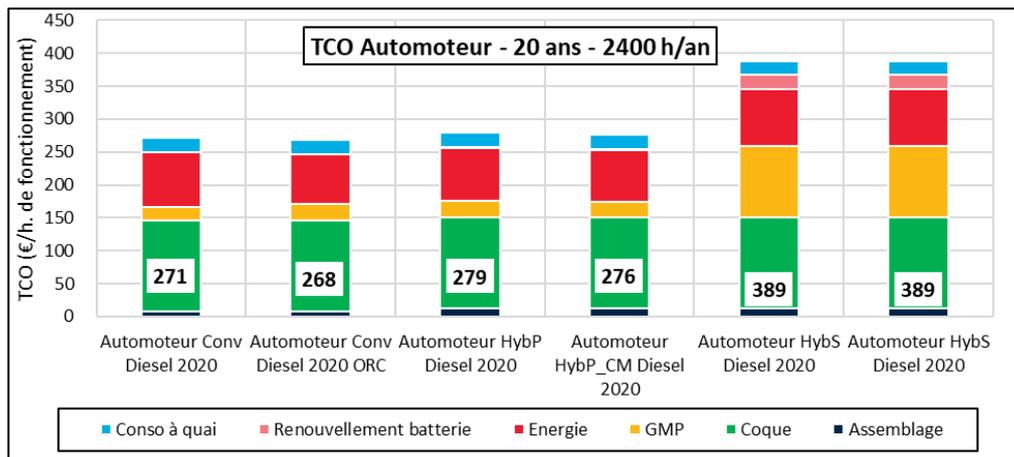


Figure 43 : Evolution du TCO de l'Automoteur en fonction de l'architecture moteur, réf. 2020

Comme le montre la Figure 43, il n'y a encore une fois pas de solution particulièrement intéressante qui se dégage de cette analyse. Pour les architectures hybrides comme pour l'ORC, le gain de consommation de carburant permis par l'hybridation est compensé par le surcoût lié au changement de motorisation (partie orange). Un faible surcoût est aussi associé aux technologies hybrides pour l'assemblage car la multiplication des éléments de motorisation dans un espace cabine fixe et exigu rend les opérations d'installation moteur plus compliquées à réaliser.

L'architecture hybride série se détache en revanche par son TCO bien plus élevé que les autres configurations. C'est dû principalement au besoin d'une batterie de taille importante pour stocker l'électricité alimentant le moteur électrique (2000 kWh alors que celle de l'hybride parallèle n'en fait que 40, 185 pour l'hybride parallèle avec changement moteur). Cette batterie entraîne d'une part un surcoût important pour l'investissement en GMP (le coût de la batterie étant directement proportionnel à sa taille en kWh) et d'autre part un surcoût lié au renouvellement de cette batterie à mi-vie moteur (renouvellement à 10 ans). Cette conclusion est donc liée au dimensionnement retenu pour l'architecture « hybride série », tel que décrit dans la section 4 *Modélisation énergétique des bateaux*.

Enfin la Figure 44 montre les résultats pour la pile à combustible à hydrogène et à biométhanol. L'architecture PAC (notée « Fcell ») entraîne une multiplication du TCO par 2 en 2020, en raison du surcoût lié au GMP (plus élevé pour l'H2 que le biométhanol en raison du réservoir, le reformeur a un impact modéré), de l'énergie et du renouvellement batterie et PAC. En 2050, les solutions PAC restent légèrement plus chères que le GNR conventionnel mais l'écart s'est largement resserré (22% d'écart au maximum). Les deux solutions pile à combustible hydrogène et méthanol ont un TCO équivalent en 2050, le surcoût lié au reformeur de méthanol étant compensé par le coût du réservoir H2 pour la partie GMP, et les coûts des énergies étant équivalents pour la partie dépense énergétique.

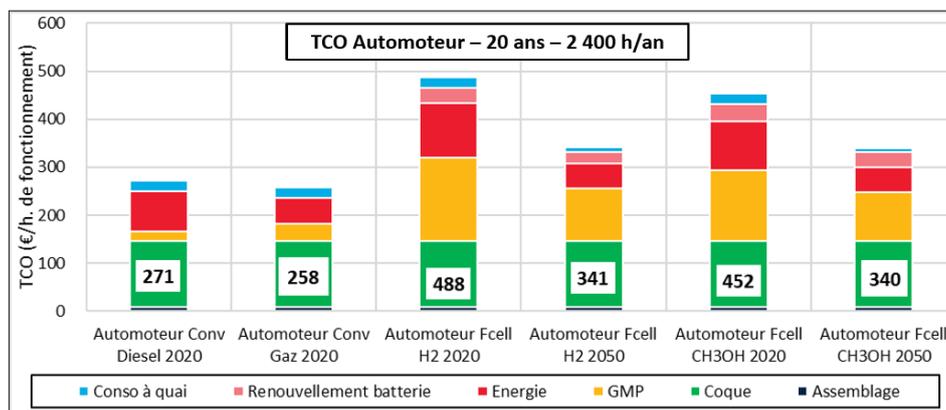


Figure 44 : Evolution du TCO pour les configurations pile à combustible

5.4 Analyses de sensibilité

L'analyse TCO requiert la définition d'hypothèses, sur les coûts, les consommations, la nature des technologies, pouvant fortement influencer la comparaison entre les configurations. L'analyse de sensibilité vise à assouplir la contrainte sur certaines hypothèses en observant l'évolution du TCO si un paramètre est modifié. Dans le cas de cette étude, de nature comparative, l'important sera surtout d'observer la modification des hiérarchies entre les solutions, plus que les valeurs brutes.

5.4.1 Consommation de carburant

La consommation de carburant est estimée en amont en suivant la méthodologie décrite en section 4 *Modélisation énergétique des bateaux*, basée sur la modélisation énergétique des systèmes. Cette estimation s'appuie également sur un grand nombre de paramètres dont la définition des cycles d'usage représentatifs des familles de bateaux et de leur exploitation sur le bassin Rhône-Saône.

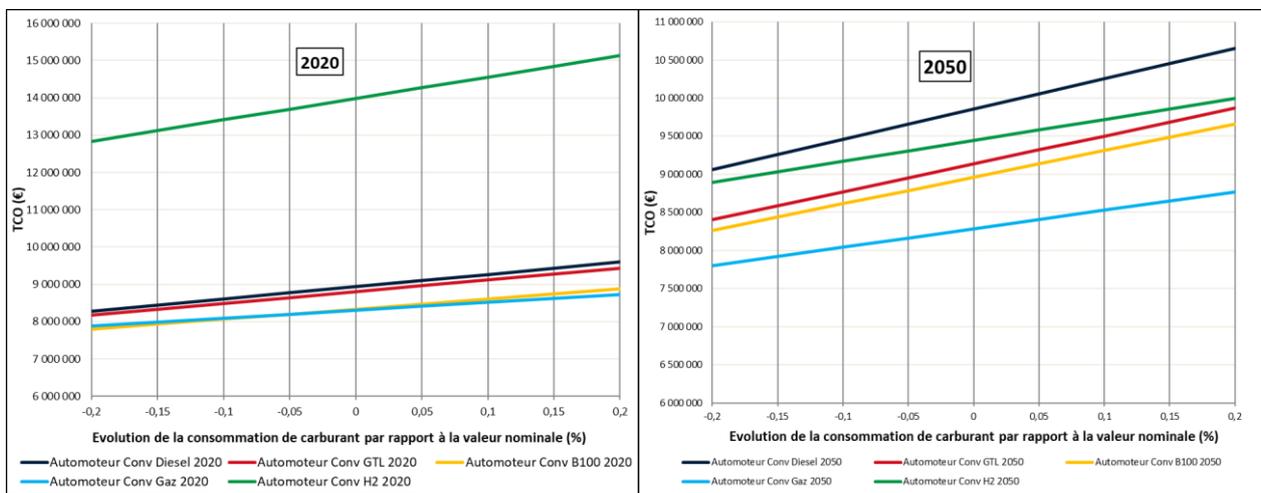


Figure 45 : Analyse de sensibilité du TCO sur la consommation de carburant de l'automoteur conventionnel

La Figure 45 montrent que pour un tonnage équivalent embarqué, une variation de la consommation de carburant de plus ou moins 20% ne modifie pas la hiérarchie entre les solutions, en 2020 comme en 2050.

5.4.2 Durée de vie moteur

La durée de vie moteur a été fixée à 20 ans après discussions avec les opérateurs sur le bassin, mais on remarque de grandes disparités dans la durée de vie entre les familles de bateaux, et également entre les unités d'une même famille. Une analyse de sensibilité sur ce paramètre permet de tester la validité des conclusions de l'étude sur un cas où la durée de vie moteur est différente.

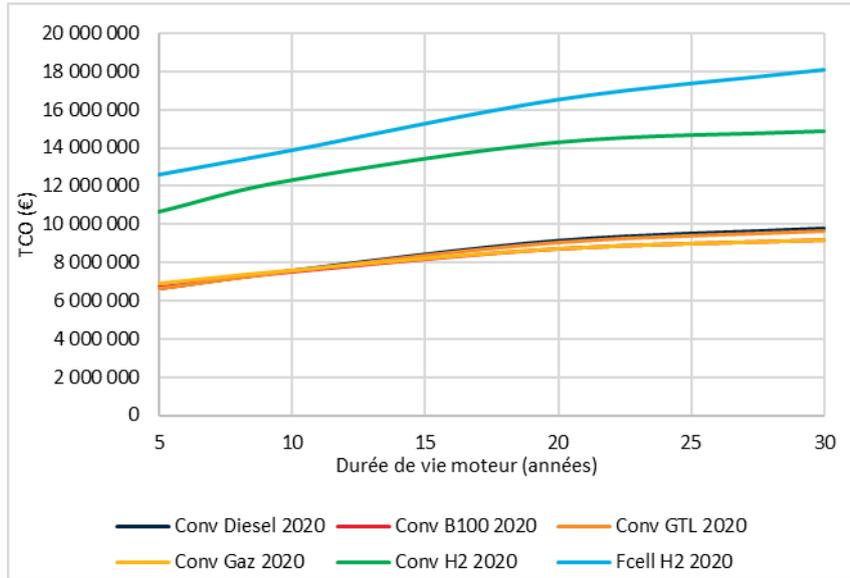


Figure 46 : Influence de la durée de vie moteur sur le TCO de l'automoteur en 2020

La Figure 46 montre la sensibilité du TCO à la durée de vie moteur en 2020. La hiérarchie est légèrement modifiée entre les carburants GtL, B100, Gaz et GNR, mais leurs TCO sont très proches donc la variation est faible.

La

Figure 47 montre la même sensibilité pour l'ensemble des architectures à hydrogène, en 2020 (gauche) et 2050 (droite). Une durée de vie de 10 ans a été considérée pour la pile à combustible, l'évolution de la durée de vie moteur influe donc sur le besoin ou non d'un renouvellement de la pile durant la vie du moteur. On voit que dans toutes les configurations, la durée de vie moteur ne modifie pas la hiérarchie entre les solutions, bien que l'évolution du nombre de renouvellements batterie et pile à combustible ait été prise en compte.



Figure 47 : Influence de la durée de vie moteur sur le TCO automoteur, motorisations à hydrogène

5.5 Résultats marquants sur les autres familles de bateaux

Les résultats détaillés pour chaque famille de bateaux sont disponibles dans les slides de synthèse de l'étude, ainsi que dans l'outil de calcul TCO mis en place. La plupart des conclusions sont similaires à celles concernant l'automoteur, mais quelques différences marquantes sont évoquées ci-dessous.

La consommation des bateaux à quai est prise en compte pour les analyses économique et environnementale, basée sur l'hypothèse que les heures de fonctionnement à quai correspondaient au complémentaire des heures de navigation sur une année. Cette hypothèse, bien que forte, a peu d'influence sur le TCO de l'automoteur puisque la recharge à quai représente moins de 10% du TCO. En revanche sur d'autres architectures, surtout les bateaux transportant des passagers, la consommation à quai représente près de la moitié du TCO en 2020, comme le montre la Figure 48. L'électrification de cette consommation à partir de 2035 permet d'alléger ce poste de dépense pour l'ensemble des familles de bateaux, mais il représente toujours plus de 20% du TCO du paquebot en 2050.

Cela ne modifie pas la hiérarchie entre les solutions puisque la consommation est la même pour toutes les configurations d'une famille donnée, mais cela fait significativement augmenter la valeur brute du TCO.

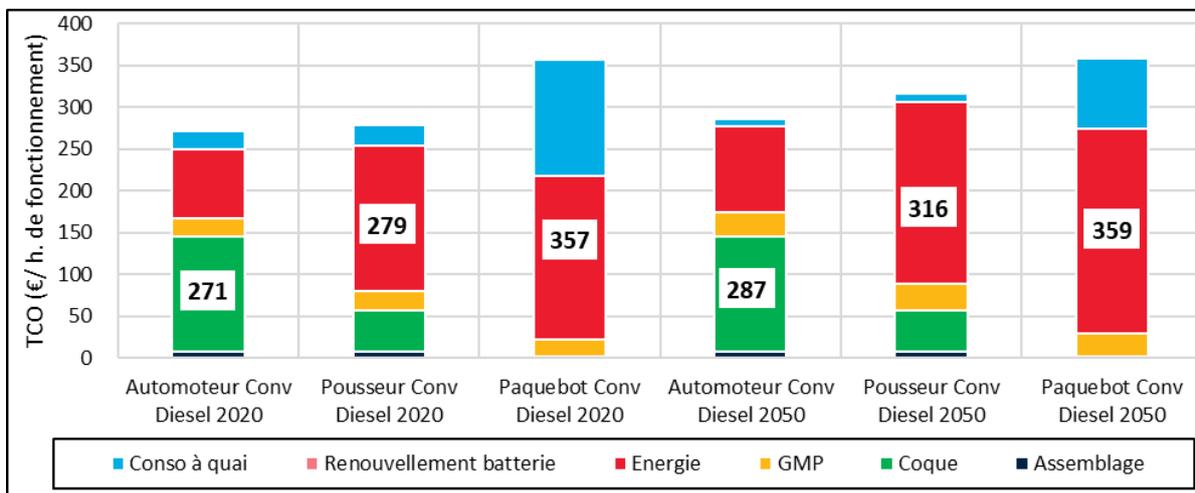


Figure 48 : Influence de la recharge à quai sur le TCO par bateau, 2020 et 2050

La Figure 48 met également en évidence la différence dans la structure du TCO entre Automoteur et Pousseur de ligne, les deux bateaux de fret, en 2020 et 2050. Dans le cas de l'automoteur, la dépense énergétique représente moins de la moitié du TCO, la partie investissement liée à la coque étant prépondérante.

A l'inverse la dépense énergétique représente plus de 60% du TCO du pousseur de ligne, la coque étant un poste de dépense plutôt faible. Ainsi la minimisation du coût de la conversion de la flotte Automoteur devra passer par une incitation au rétrofit, tandis que c'est le paramètre « prix de l'énergie » qui aura le plus d'influence sur la minimisation du coût de la transition pour le pousseur.

L'analyse ne peut pas être réalisée sur les familles de bateaux pour lesquelles les informations sur le coût de la coque n'étaient pas disponibles, comme le paquebot.

5.6 Conclusion de l'analyse économique

L'analyse économique permet de mettre en évidence les solutions permettant de limiter le coût de la conversion de la flotte fluviale sur le bassin Rhône-Saône.

Il en ressort qu'aujourd'hui aucune solution ne se distingue des configurations de référence GNR par un TCO plus intéressant, que ce soit du point de vue des vecteurs ou des architectures. En revanche les solutions à hydrogène entraînent une multiplication du TCO par deux à trois, en particulier la « pile à combustible ». En 2050, la hausse du prix des énergies fossiles rend les configurations GNR plus chères que les alternatives décarbonées et ce sont les carburants alternatifs, principalement BtL et B100 qui sont parmi les plus intéressantes. Le TCO le plus bas revenant au biogaz pour l'ensemble des architectures. L'analyse économique ne rend pas compte de l'effort d'investissement que devront réaliser la puissance publique et les acteurs du secteur afin de répondre au nouveau besoin en infrastructure induit par la transition énergétique. Le besoin en infrastructure de recharge n'a notamment pas été quantifié.

La prise en compte de la consommation d'énergie à quai exerce une influence disparate sur les différentes familles de bateaux, mais elle ne modifie pas la hiérarchie entre les technologies.

Ces résultats seront ensuite à combiner avec l'analyse environnementale réalisée (section suivante), afin d'établir les scénarios de transition permettant de respecter les critères de réduction des émissions de GES tout en minimisant le coût du changement (voir *7 section Projection et scénarii de verdissement de la flotte Rhône-Saône*).

6 Analyse environnementale des solutions de propulsion au travers de l'Analyse Cycle de Vie (ACV)

6.1 La méthodologie d'ACV

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthodologie normée (Finkbeiner, Inaba, Tan, Christiansen, & Klüppel, 2006) qui permet d'évaluer les potentiels impacts d'un système (produits ou services) sur l'environnement. Comme l'illustre la Figure 49, les impacts d'un système sur l'environnement, qui résultent des différents flux (matière, énergie) entrants et sortants tout au long de son cycle de vie (inventaire du cycle de vie), sont de différentes natures et ont des répercussions à différents niveaux (effets et dommages finaux).

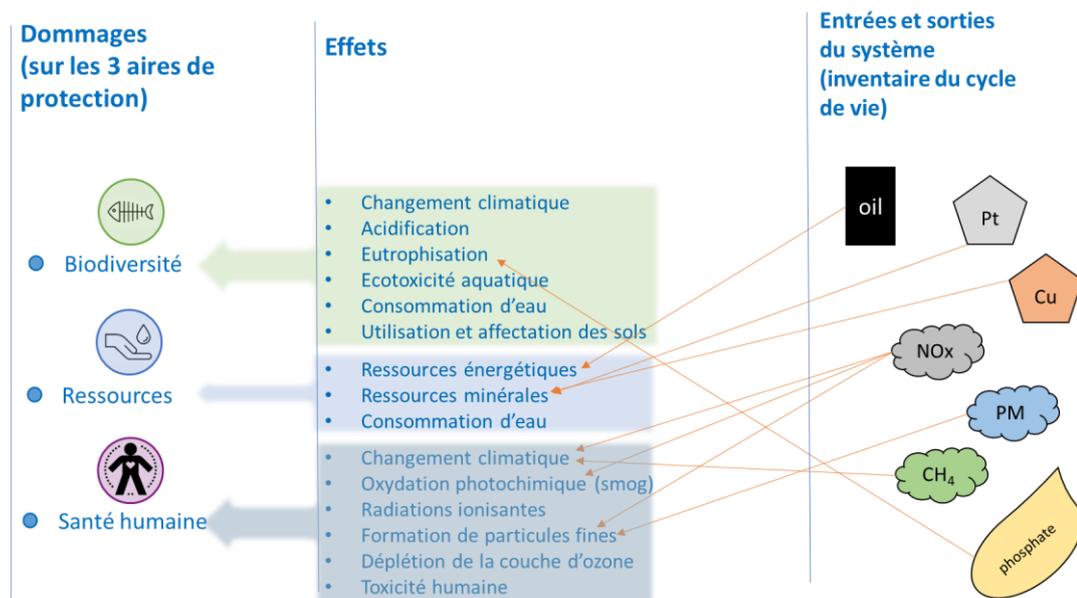


Figure 49 : Illustration des impacts environnementaux d'un système de l'inventaire du cycle de vie aux dommages finaux.

La méthodologie d'ACV repose sur les quatre étapes principales de la Figure 50, et présente souvent des itérations entre les différentes étapes ou à l'issue d'une première analyse :

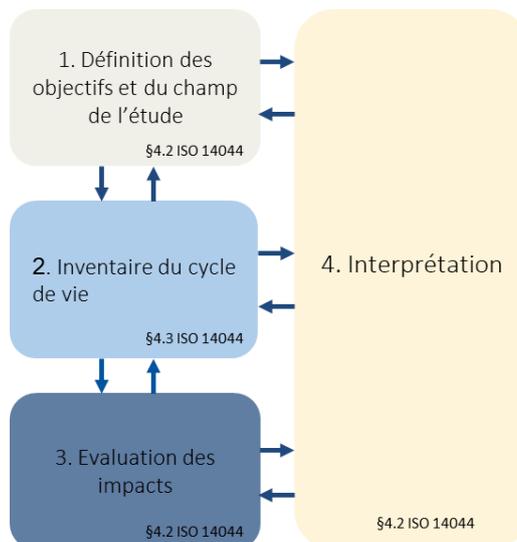


Figure 50 : les étapes de l'ACV.

- **Définition des objectifs et du champ de l'étude** : cette première étape consiste à poser le cadre de l'étude et identifier les données nécessaires. Il s'agit de préciser l'objectif de l'ACV : objectifs de développement durable, d'exigences réglementaires, de communication, d'obtention de labels, d'éco-conception, etc. La définition de l'objectif oriente le champ d'application de l'étude, c'est-à-dire les contextes géographiques et temporels considérés, le périmètre du système, le(s) système(s) de référence pour une éventuelle comparaison etc. Enfin, l'unité fonctionnelle relative au système étudié doit être formulée, à savoir la description précise de la fonction du système (fonction/service rendu, niveau de performance, durée de vie/de service) ; celle-ci permet de rapporter les résultats de l'ACV à une unité donnée (par exemple : 1 tonne transportée sur 1 km), et de comparer plusieurs systèmes de même fonction (impératif pour la comparaison).
- **Inventaire du cycle de vie** : après avoir défini l'objectif et le champ de l'étude, les données d'inventaire à collecter correspondent, sur le périmètre choisi, à tous les flux entrant dans le système (matières premières, énergie, occupation des sols...) ou en sortant (produits, émissions vers l'air, l'eau et le sol, déchets...), en relation avec l'unité fonctionnelle sélectionnée. Les entrées et les sorties peuvent être liées à la biosphère (nature) ou à la technosphère (activités humaines). La description de l'inventaire de premier plan (informations fournies et déterminées par le décideur en relation avec l'étude ACV) doit être aussi précise que possible, en indiquant par exemple la nature, l'emplacement, la quantité, l'archétype d'émission ou le compartiment d'arrivée de chaque flux. De la même manière, les données d'arrière-plan (activités et processus sur lesquels aucune influence directe ne peut être exercée) doivent être décrites avec précision en ce qui concerne les technologies utilisées, les schémas d'approvisionnement etc. Ces activités peuvent être décrites à l'aide de bases de données génériques d'ACV (par exemple, la composition du mix réseau électrique français en 2021). Les données d'inventaire peuvent être affinées tout au long de l'étude. Enfin, si le système comporte des sous-étapes impliquant des co-produits, des règles d'allocation des impacts entre ces co-produits doivent être appliquées.
- **Evaluation des impacts du cycle de vie** : l'évaluation est réalisée à l'aide d'une méthode de caractérisation, c'est-à-dire un ensemble d'indicateurs environnementaux (indicateur d'impact sur le changement climatique, de formation de particules fines, de consommation de ressources etc.) calculés avec une méthode donnée. Une liste des indicateurs les plus pertinents pour l'étude doit être établie en lien avec l'objectif et la portée de l'étude, les éventuelles problématiques spécifiques au système déjà identifiées, la communication envisagée des résultats etc. Les flux d'inventaire sont traduits en leurs impacts sur l'environnement à l'aide de facteurs de caractérisation, permettant d'exprimer dans une même unité les impacts potentiels de différents composés dans une catégorie donnée (par exemple, impact total de différents gaz à effet de serre sur le changement climatique exprimé en « kg équivalent CO₂ »).
- **Interprétation** : l'interprétation concerne non seulement les résultats d'impact (analyser les causes de ces impacts, les contributions des différentes étapes/procédés/flux aux différents impacts, comparer les impacts de différents systèmes etc.) mais aussi la phase d'inventaire (par exemple, analyse de la qualité des données ou de l'influence du choix de la base de données sur le résultat final) ou encore la première étape de définition de l'objectif et du champ de l'étude (remise en perspective par rapport aux objectifs fixés, au périmètre retenu, au contexte spatio-temporel etc.).

6.2 Objectif et champ de l'étude

6.2.1 Objectif

La présente étude a pour objectif d'analyser les potentiels impacts environnementaux d'une sélection de vecteurs énergétiques et d'architectures de groupe motopropulseur associées, pour les différentes applications retenues dans le périmètre de l'étude (voir section 2), afin d'identifier les solutions les plus pertinentes sur le plan environnemental pour décarboner la flotte du bassin Rhône-Saône dès à présent et à moyen et long terme, et ce en s'intéressant non pas seulement au périmètre « réservoir à l'hélice » mais également aux cycles de vie des vecteurs et des composants. Pour chaque famille de bateaux, il s'agira donc d'une ACV comparative des performances des différentes architectures de groupe motopropulseur, en fonction du vecteur énergétique utilisé.

6.2.2 Champ de l'étude

L'analyse concerne le bassin Rhône-Saône (contexte français), et se concentre sur trois horizons de temps : actuel (2020/2022), intermédiaire (2035) et long terme (2050). Les cas étudiés sont ceux constitutifs de la matrice présentée en section 2 *Périmètre de l'étude* comportant cinq applications (trois pour le transport de marchandises : automoteur, pousseur de ligne, pousseur urbain, et deux pour le transport de passagers : paquebot, promenade), chacune avec quatre ou cinq architectures de groupe motopropulseur (conventionnelle, hybride série, hybride parallèle, électrique ou pile à combustible), lequel peut être alimenté par différents vecteurs (carburants liquides ou gazeux, électricité pour architecture électrique et hydrogène ou biométhanol pour architecture pile à combustible). L'architecture pile à combustible a été considérée à partir de 2035 seulement, n'étant pas encore déployée massivement à l'horizon actuel. De même, l'hydrogène combustible n'est pas déployé sur les flottes fluviales à l'horizon actuel, mais les résultats d'impact sur le changement climatique de ce vecteur sont néanmoins présentés pour pouvoir en apprécier l'évolution en fonction de l'évolution escomptée du mix électrique français.

6.2.3 Périmètre de l'étude

Afin de mener une évaluation exhaustive des impacts environnementaux causés par la mise en œuvre des différentes solutions, le périmètre d'étude inclut à la fois le cycle de vie des équipements et celui des vecteurs énergétiques : du berceau à l'utilisation (respectivement du puits à l'hélice), c'est-à-dire de l'extraction des matières premières à l'utilisation des équipements ou des vecteurs, en passant par les étapes de production, assemblage et distribution, et incluant la maintenance (par exemple, remplacement des batteries). Notamment, la phase d'utilisation des bateaux inclut 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 (branchement à des groupes électrogènes ou à des bornes électriques pour les besoins à quai) – comme explicité dans la section 3, les consommations de bord et de manœuvre sont négligées. Enfin, la fin de vie des composants du GMP est exclue du périmètre de l'étude étant donné le peu d'incidence de qu'ils ont sur les résultats GES (voir Figure 53 et Figure 54) et les incertitudes sur le devenir des composants ou les filières de traitement à considérer (taux de recyclage, etc.).

Par ailleurs, l'approche comparative par famille de bateaux permet de restreindre le périmètre d'évaluation des impacts des équipements aux composants différenciant, à savoir le groupe motopropulseur. Autrement dit, le cycle de vie des coques de bateaux et autres composants est exclu du périmètre d'étude car identique pour tout groupe motopropulseur pour une famille de bateaux donnée.

La Figure 51 illustre le périmètre de l'étude pour chaque cas.

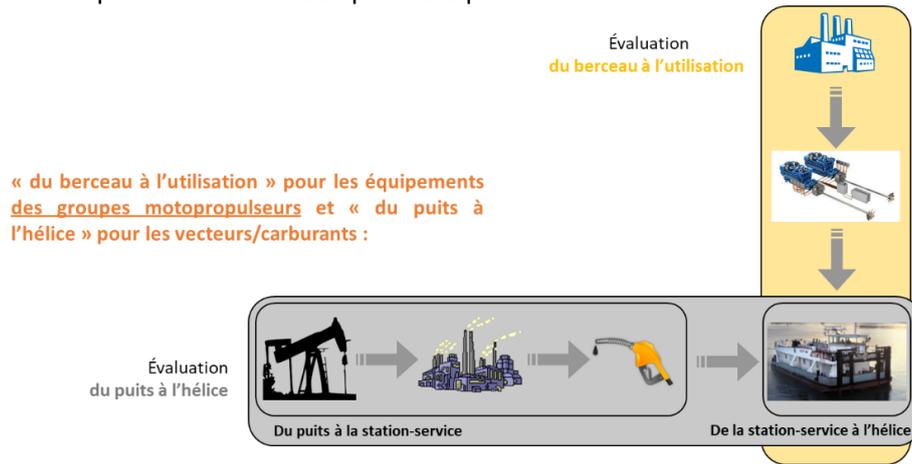


Figure 51 : périmètre de l'étude ACV.

6.2.4 Unité fonctionnelle

- Pour le transport de marchandises et selon la famille de bateaux (impliquant des tonnages et des distances de transport différents), la fonction retenue est : transporter [chargement moyen par trajet] tonnes sur [distance moyenne par trajet] km en moyenne chaque année, [heures moyennes de circulation] heures par an, pendant 20 ans.
 - o Les résultats de l'ACV sont alors rapportés à 1 tonne.km (tkm) transportée.
- Pour le transport de passagers et selon l'application (impliquant un nombre de passagers et des circuits différents), la fonction retenue est : transporter [nombre moyen par circuit] passagers sur [distance moyenne par circuit] km en moyenne chaque année, [heures moyennes de circulation] heures par an, pendant 20 ans.
 - o Les résultats de l'ACV sont alors rapportés à 1 personne.km (pkm) transportée.

L'évaluation est réalisée sur 20 ans, correspondant à la durée de vie des groupes motopropulseurs. Les chargements moyens, nombre moyen de passagers, distances moyennes par trajet et heures moyennes de circulation par an sont fixés par défaut aux valeurs données dans le Tableau 22. L'outil Excel associé permet de réaliser des analyses de sensibilité des résultats aux paramètres du système pour vérifier leur influence sur les résultats absolus.

Tableau 22 : Valeurs moyennes annuelles par défaut pour les heures de circulation, les tkm transportés et les pkm transportés

	Automoteur	Pousseur ligne	Pousseur urbain	Promenade	Paquebot
Heures de circulation par an ⁴	2 400	1 500	2 000	650	1 092
tkm par an ⁵	40 000 000	20 000 000	200 000	N/A	
pkm par an	N/A			150 000 ⁶	1 632 000 ⁷

⁴ D'après l'analyse du recensement de la CRMT pour le bassin Rhône-Saône en 2020.

⁵ Arrondi d'après valeurs moyennes fournies par VNF.

⁶ 230 000 p/an à Lyon pour 20 bateaux promenade en 2019 (communiqué de presse VNF du 19 février 2020) * ~10 km/trajet (estimation).

⁷ env. 120 p/trajet (85% * capacité moyenne ~140 p) * 34 trajets/an * env 400 km/trajet – d'après données Agiship (communication par mail).

Enfin, la prise en compte des heures de circulation par an implique de tenir compte du temps passé à quai et donc d'attribuer à chaque tkm ou pkm transportée une fraction des impacts correspondant à cette phase de stationnement des bateaux. Ainsi, la consommation à quai est comptabilisée pour chaque application (sauf pousseur urbain : consommation négligeable) selon les données de le Tableau 23 (fournies par des opérateurs contactés par VNF), avec l'hypothèse qu'elles s'appliquent pendant tout le temps passé à quai - ce qui représente le pire des cas.

Tableau 23 : hypothèses pour la prise en compte de la consommation à quai

	Automoteur	Pousseur ligne	Promenade	Paquebot
Besoin net consommation à quai		15 kW		120 kW
Alimentation	Avant 2035 : groupes électrogènes alimentés par le vecteur servant à la propulsion : rendement total de charge de 39% Dès 2035 : tout électrique (quais équipés de bornes), alimenté par le mix électrique national (prospectif) : rendement total de charge de 80%			

6.2.5 Indicateurs environnementaux

Les trois indicateurs suivants ont été retenus et sont analysés avec la méthode de caractérisation *Environmental Footprint 3.0* recommandée par l'Europe (Fazio, et al., 2018) :

- **Impact sur le changement climatique via les émissions de gaz à effet de serre (GES)** : il s'agit de la problématique centrale et globale pour laquelle la présente étude pour le verdissement des flottes est menée (objectifs de l'étude).
 - L'indicateur retenu tient compte du pouvoir de réchauffement global des différents GES via leur forçage radiatif, et s'exprime en kg équivalent CO₂ (kg CO₂ eq.).
- **Impact sur la santé humaine via la formation de particules fines** : cette problématique localisée permet de rendre compte des répercussions des émissions de particules ou de leurs précurseurs (NO_x, NH₃, SO₂, COV...) sur la santé humaine. En effet, de telles substances peuvent être émises tant sur la phase « amont » de production de carburants (amont agricole, fermentation...) que sur la phase d'utilisation (combustion), ou encore sur le cycle de vie des équipements (extraction minière, production d'énergie...).
 - L'indicateur retenu tient compte du taux d'inhalation moyen des particules - directement émises ou formées par des précurseurs - selon la densité de population sur le lieu d'émission (faible ou élevée), de la réponse de l'organisme à cette inhalation (« fonction dose-réponse ») et du risque final de maladie induite (basé sur des données épidémiologiques), et s'exprime en incidence de maladies (« disease incidence »).
- **Impact sur les écosystèmes aquatiques via l'écotoxicité des substances** : cette problématique localisée au niveau des différents milieux aquatiques rencontrés tout au long du cycle de vie (donc pas seulement à la phase d'utilisation / de navigation) permet de rendre compte des répercussions finales des émissions de toutes substances toxiques (vers l'eau, l'air ou le sol) pour les écosystèmes aquatiques (eau douce).
 - L'indicateur retenu tient compte de la persistance des substances dans l'environnement (dégradation, transfert...), de la fraction transférée à la population aquatique concernée et de la fraction des espèces présentes finalement exposée à ces substances et s'exprime

- en unité de toxicité comparative (« comparative toxicity unit », CTU, homogène à une fraction d'espèces potentiellement affectée (FPA) intégrée sur le temps et le volume : FPA.m³.jour). Il s'agit en revanche d'un indicateur peu robuste (incertitudes sur les facteurs de caractérisation des impacts) par rapport aux deux autres, son interprétation est donc à relativiser, notamment en termes d'écart significatifs entre deux résultats
- Cette analyse se distingue d'une analyse de risque puisqu'elle ne consiste pas à évaluer un scénario accidentel - comme les impacts d'une fuite de carburant vers l'eau, par exemple) – mais simplement les impacts des substances émises sur le cycle de vie « normal » d'un produit ou d'un service.

6.3 Inventaire du cycle de vie

Les modélisations sont implémentées dans le logiciel ACV SimaPro v.9.3, avec la base de données d'arrière-plan Ecoinvent v3.8 (qui contient des jeux de données relatifs à la fabrication d'équipements, de matériaux, à la production d'électricité etc.).

6.3.1 Groupes motopropulseurs

Les données sur la fabrication des éléments du groupe motopropulseur pour chaque type d'architecture proviennent, soit directement de la base de données Ecoinvent, soit de la littérature (modélisation dans SimaPro à partir d'informations sur les matériaux et utilités consommés pour leur fabrication).

Le Tableau 24 résume la source des données ou les jeux de données Ecoinvent utilisés pour modéliser les différents équipements des groupes motopropulseurs en fonction de l'architecture.

La densité de puissance massique des moteurs thermiques et électriques est reprise de travaux antérieurs réalisés par IFPEN : étude E4T2040 [52]. Elle est considérée constante jusqu'en 2050 (évolutions potentiellement non significatives et peu d'incidence sur les résultats). Les jeux de données Ecoinvent étant fournis par unité de masse de moteur, une proportionnalité masse-puissance est appliquée. L'électronique de puissance est assimilée à un onduleur de même type que pour les véhicules électriques, en appliquant également une proportionnalité masse-puissance.

La modélisation de la pile à combustible a été reprise de l'étude TranplHyn [53]. En revanche, la fabrication de la fibre de carbone contenue dans le stack a été modélisée avec des données plus récentes et plus complètes issues de (Benitez, et al., 2021). De plus, les hypothèses sur l'évolution de la densité de puissance des cellules et de la teneur en platine sont identiques à celles de l'étude E4T 2040 (valeur actuelle utilisée pour les cas 2035, valeur améliorée utilisée pour les cas 2050) : 225 W/cellule et 0,44 g Pt/kW jusqu'en 2035, puis 337,5 W/cellule et 0,25 g Pt/kW en 2050. La durée de vie de la pile à combustible est fixée à 30 000 h jusqu'en 2050, correspondant à une valeur optimiste à l'horizon actuel, atteignable d'ici 2035 et conservée jusqu'en 2050 faute de vision pertinente sur la possible évolution de ce paramètre.

Pour toutes les architectures nécessitant une batterie Li-ion, la chimie courante NMC-622/G est modélisée sur tous les horizons de temps (i.e. pas d'évolution de la chimie ou de la technologie considérée d'ici 2050, faute de données disponibles), en tenant compte d'une amélioration de la densité d'énergie des cellules qui double d'ici 2050 : 180 Wh/kg à l'horizon actuel (valeur type pour les cellules de batteries NMC actuelles, entre 150 et 220 Wh/kg (Battery University, s.d.)) et 360 Wh/kg en 2050 (estimation interne IFPEN). En 2035, la moyenne intermédiaire de 270 Wh/kg est alors utilisée. Enfin, une durée de vie de 8 ans est considérée pour toutes les applications, sauf les promenades qui sollicitent moins la batterie dont la durée de vie est alors estimée à 15 ans. Ainsi, le remplacement des batteries sur la durée de vie du groupe motopropulseur est intégré à la modélisation.

Tableau 24 : Source des données pour la modélisation des différents équipements des groupes motopropulseurs en fonction de l'architecture

	Conventionnel	Hybride série	Hybride parallèle	Electrique	Pile à combustible
Moteur thermique	Ecoinvent "Marine engine construction {GLO}" Proportionnalité masse-puissance (0,45 kW/kg)			N/A	
Moteur électrique	N/A	Ecoinvent "Marine electric motor construction {GLO}" Proportionnalité masse-puissance (2,5 kW/kg)			
Générateur	N/A	Identique au moteur électrique (même structure et composition)			
Batterie Li-ion	N/A	Données tirées de (Majeau-Bettez, Hawkins, & Strømman, 2011), pour une batterie NMC-442/G, adaptées à la chimie NMC-622 par stœchiométrie (composition électrode NMC)			
Electronique de puissance	N/A	Ecoinvent "Inverter, for electric passenger car {GLO}" Proportionnalité masse-puissance du moteur (correspond à un onduleur de 9,5 kg pour un moteur de 100 kW)			
Pile à combustible + auxiliaires	N/A				Stack : (Evangelisti, Tagliaferri, Brett, & Lettieri, 2017) Plaques bipolaires : (Miotti, Hofer, & Bauer, 2017) Fibre de carbone : (Benitez, et al., 2021)

6.3.2 Réservoirs

Les réservoirs sont modélisés à partir de données de littérature sur leur composition en fonction du vecteur stocké. Un volume maximum de 66 m³ est considéré pour les réservoirs à hydrogène - correspondant à la place occupée par deux containers - pour tenir compte des contraintes de volume et de masse à ne pas dépasser.

Pour les carburants liquides, le réservoir est modélisé en considérant du polyéthylène (haute et basse densité) dont les quantités pour le réservoir de GNR de 33 m³ sont approximées par les quantités de polyéthylène indiquées dans le jeu de données Ecoinvent « barge tanker production » (941 kg HDPE + 1 880 kg LDPE), qui correspond à un bateau de capacité 1 200 t. Les réservoirs de taille inférieure (pousseurs urbains, promenades) sont proportionnellement mis à l'échelle (volume-masse). La prise en compte du polyéthylène pour les réservoirs semble être erronée car l'article 8.05 du document ES-TRIN du Comité Européen pour l'Elaboration de Standards dans le domaine de la Navigation Intérieure (CESNI, 2017) stipule que les réservoirs liquides pour la navigation intérieure doivent être en acier. La correction n'a pas pu être intégrée en fin d'étude ; cette modification de la modélisation environnementale des réservoirs ne devrait pas modifier les conclusions de l'étude du fait du faible impact des composants du GMP sur les résultats GES totaux (voir Figure 53 et Figure 54).

Pour le gaz naturel et le biogaz, une donnée fournie par GRDF dans le cadre d'une précédente étude IFPEN effectuée pour l'AFG⁸, pour des réservoirs de type I en acier pour poids lourds, a été reprise : 93 kg d'acier renforcé par réservoir de 80 L. La quantité d'acier est proportionnellement adaptée au volume total des réservoirs pour chaque application.

Pour l'hydrogène (gazeux), un stockage à 350 bar à l'horizon actuel puis à 700 bar dès 2035 est pris en compte pour toutes les applications. Les réservoirs en composite fibre de carbone correspondants sont modélisés grâce aux données d'inventaire fournies dans (Agostini, et al., 2018) : réservoirs de type III (350 bar) et type IV (700 bar). Comme pour la pile à combustible, la fabrication de la fibre de carbone est modélisée d'après (Benitez, et al., 2021). A nouveau, les quantités de matériaux sont mises à l'échelle en proportion du volume total des réservoirs requis pour chaque application. L'étude ne considère pas de rupture technologique sur la conception des réservoirs, qui permettrait de réduire leur impact environnemental.

A noter que les différents volumes de réservoirs décrits ne permettent pas aux bateaux d'avoir les mêmes autonomies. Ces volumes ont été définis de telle sorte à respecter une forme de cohérence entre les types de vecteurs transportés et les places disponibles sur les bateaux. L'établissement de ces volumes demeure une approximation à considérer dans les différentes analyses.

6.3.3 Vecteurs énergétiques

6.3.3.1 Gazole non routier (GNR)

L'approvisionnement en GNR est modélisé à l'aide du jeu de données Ecoinvent « market for Diesel, low-sulfur {Europe without Switzerland} » en considérant un PCI de 43 MJ/kg.

6.3.3.2 Biodiesel conventionnel (B100)

La filière considérée correspond à du biodiesel conventionnel produit par estérification d'huile de colza sur tous les horizons, ce qui permet d'avoir un comparatif avec les autres types de biocarburants (avancés) en 2035 et en 2050 et de considérer un mix de consommation moyen en biocarburants n'excluant pas totalement la présence de B100 conventionnel d'ici 2050. Les données d'inventaire sur l'approvisionnement proviennent de la dernière étude WTW 2020 du JRC (« Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context ») (JRC, 2020). Pour la culture du colza, le jeu de données Ecoinvent « Rape seed production {FR} » a été copié et adapté en y remplaçant les quantités de pesticides, engrais, chaux, semences et énergie consommés par les quantités fournies par le JRC, ainsi que les émissions de N₂O au champ (liées à la dégradation des composés azotés). L'utilisation du jeu de données Ecoinvent permet en effet de prendre en compte des données d'inventaire supplémentaires par rapport aux données du JRC (liées aux activités émettrices de GES seulement), comme l'irrigation ou les émissions vers l'eau et le sol. Son adaptation permet donc de caractériser d'autres impacts que les émissions de GES (causés par certaines émissions vers le sol ou l'eau, par exemple).

6.3.3.3 Biodiesel avancé « Biomass to liquid » (BtL)

La filière de production du diesel de synthèse avancé modélisée « Biomass to Liquid » (BtL) consiste en la gazéification de déchets de bois donnant lieu à un gaz de synthèse (mélange de CO₂, CO, H₂, H₂O), suivie d'une transformation par la réaction Fischer-Tropsch pour obtenir des carburants liquides chimiquement équivalents à leurs homologues fossiles (principalement diesel et naphta). Les données d'inventaire proviennent à nouveau de l'étude du JRC (JRC, 2020), et correspondent à un procédé de production de BtL auto-suffisant en énergie (alimenté par une fraction du bois consommé, pris en compte dans le rendement global).

⁸ <https://www.ifpenouvelles.fr/article/analyse-du-cycle-vie-acv-des-vehicules-fonctionnant-au-gnv-et-biognv>

6.3.3.4 Biodiesel issu d'huiles usagées hydrotraitées (« Hydrotreated Vegetable Oil », HVO)

Le biodiesel issu d'huiles usagées est obtenu par hydrotraitement (HVO) des huiles. L'étude du JRC (JRC, 2020) fournit à nouveau des données d'inventaire pour la modélisation de l'approvisionnement en HVO, qui sont reprises pour modéliser une filière française dans SimaPro.

6.3.3.5 Diesel « Gas to Liquid » (GtL)

Le GtL est obtenu par un procédé de liquéfaction de gaz naturel. Ce même procédé est considéré jusqu'en 2050 (i.e. pas de GtL issu de biogaz, par exemple) pour pouvoir comparer les impacts des vecteurs innovants à ceux de ce vecteur fossile largement utilisé, tout comme le GNR. La modélisation de la production de GtL s'appuie sur des données d'inventaire de 2013 du NETL (Goellner, et al., 2013) (issues de simulations AspenPlus). Le procédé est auto-suffisant en énergie, à l'instar du BtL.

6.3.3.6 Biométhanol

De façon similaire au BtL, du biométhanol peut être produit à partir de biomasse gazéifiée. L'étude WTW du JRC (JRC, 2020) fournit des données d'inventaire sur ce procédé qui ont été à nouveau utilisées, et indique également un TRL 8 pour cette technologie, jugée susceptible d'être commercialisée d'ici 2035 tout comme les technologies BtL déjà disponibles.

6.3.3.7 Hydrogène

L'hydrogène en tant que combustible des moteurs thermiques ou des piles à combustible est considéré produit par électrolyse (hydrogène vert), supposant l'abandon des voies de production à partir de ressources fossiles d'ici 2035 (reformage de gaz naturel ou de charbon). La quantité d'eau consommée est renseignée selon l'équation stœchiométrique de la réaction ($2\text{H}_2\text{O} + \text{électricité} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$), i.e. 9 kg/kg H_2 . La quantité d'électricité consommée pour l'électrolyse est tirée de (Burkhardt, Patyk, Tanguy, & Retzke, 2016) : 58,3 kWh/kg H_2 , sachant que celle-ci varie typiquement entre 50 et 65 kWh/kg H_2 (ADEME, Bodineau & Sacher, 2020). Enfin, la compression de l'hydrogène à 500 bar (pour le stockage final à 350 bar) est prise à 2,7 kWh/ H_2 d'après la même étude (ADEME, Bodineau & Sacher, 2020). Pour un stockage final à 700 bar, une compression à 700 bar est considérée en première approche avec une consommation d'électricité mise à l'échelle par rapport à la quantité requise pour une compression à 500 bar.

6.3.3.8 Gaz Naturel Compressé (GNC)

L'approvisionnement en GNC est modélisé avec le mix moyen du jeu de données Ecoinvent « market for natural gas, high pressure {FR} » (pression 1-5 bar, PCI = 36,8 MJ/m³). Il comporte des importations d'Algérie (0,14%), Norvège (51,4%), Pays-bas (21,3%) et Russie (27,1%) par pipeline ou bateau (liquéfié). Selon la provenance du gaz, son procédé d'extraction induit des fuites de CH_4 entre 0,04% et 0,4% massique (Russie), et le transport par pipeline comporte des fuites de l'ordre de 0,019% massique tous les 1 000 km.

6.3.3.9 Biogaz (bio-GNC)

En 2035 comme en 2050, l'approvisionnement en bio-GNC est également modélisé à l'aide d'un jeu de données Ecoinvent correspondant à un contexte proche de la France (Suisse, CH), « market for biométhane, high pressure, vehicle grade {CH} ». Il est issu à 98% de la méthanisation (fermentation) de lisier (2%vol.), de biodéchets (37%vol.) et de boues d'épuration (61%vol.) et à 2% de gaz synthétique (obtenu par gazéification de bois, converti ensuite en CH_4 par la réaction de méthanation). Les fuites de CH_4 lors de la fermentation représentent 1% massique.

6.3.3.10 Electricité

La source d'électricité utilisée - pour la production d'hydrogène, pour l'alimentation des bateaux électriques (pousseurs urbains et promenades) et pour la consommation à quai dès 2035 - peut être sélectionnée dans l'outil Excel parmi plusieurs options afin d'apprécier la répercussion de celle-ci sur

l'impact environnemental des bateaux : mix réseau national, 100% hydraulique ou 100% éolien (cas théoriques). Pour l'alimentation des bornes électriques pour la consommation de bord, seul le mix réseau national est considéré.

Le mix réseau national actuel est celui de la base de données Ecoinvent (v3.8), « market for electricity, medium voltage {FR} ».

En 2050, deux mix prospectifs au choix sont modélisés d'après les scénarios « Futurs énergétiques » de RTE parus en 2021 (RTE, 2021) : un mix « 100% énergies renouvelables (EnR) » et un mix « 50% nucléaire – 50% EnR ». La composition de ces mix de production nationaux en % d'énergie produite est donnée en Tableau 25.

Enfin, les impacts de la source d'électricité utilisée en 2035 sont pris comme la moyenne des impacts de la source utilisée actuellement et celle utilisée en 2050 (évolution linéaire, dans la mesure où la source actuelle est le mix électrique national).

Tableau 25 : Composition des mix électriques de production nationaux prospectifs (RTE 2021) à 2050 considérés dans cette étude

	100% EnR	50% nucléaire
Hydraulique (réservoir, fil de l'eau, station de pompage)	9%	10%
Eolien onshore	21%	13%
Eolien offshore	31%	12%
Photovoltaïque	36%	13%
Biomasse (déchets, bois, biogaz)	2%	2%
Nucléaire	0%	50%

6.3.3.11 Emissions à l'échappement (phase « TTW »)

Consommations et émissions de polluants

Pour tous les vecteurs énergétiques considérés, les consommations et émissions horaires sont tirées des résultats de la modélisation énergétique (voir section 4 *Modélisation énergétique des bateaux*), en considérant les valeurs maximales des fourchettes d'émissions de polluants pour refléter le pire des cas (paramétrable dans les modélisations SimaPro).

L'hypothèse retenue pour les émissions de méthane associées à la combustion du GNC ou du bio-GNC est de 4 gCH₄/kWh pour l'horizon actuel – valeur inspiré du rapport TNO [16] qui affiche une fourchette haute à 4.5 g/kWh pour les applications gaz du secteur fluvial – émissions nettement plus élevées que celles observées dans le secteur routier. Ces émissions de méthane sont supposées diminuer avec l'amélioration des systèmes de combustion et la généralisation des systèmes de post-traitement : la valeur de 0,04 g CH₄/kWh a été retenue pour l'horizon 2050 en s'inspirant des cibles potentielles de la norme EUROVII pour le segment « long routier » ; en 2035, la valeur intermédiaire de 0,4 g CH₄/kWh est appliquée. Pour les autres vecteurs, il est supposé que les hydrocarbures (HC) imbrûlés comportent du CH₄ à hauteur de 15%.

Les consommations et émissions liées à l'utilisation de BtL et de HVO sont identiques à celles du GtL puisque ces carburants sont chimiquement similaires, toutefois le CO₂, CH₄ et le CO émis sont d'origine biogénique (impliquant un impact sur le réchauffement climatique inférieur à l'impact des mêmes molécules d'origine fossile). De même, les consommations et émissions liées à l'utilisation de bio-GNC sont identiques à celles du GNC, en considérant la nature biogénique des émissions carbonées.

Enfin, les particules fines (« particulate matter », PM) sont caractérisées par une taille moyenne de 10 µm (PM10) pour tous les vecteurs.

Emissions de CO₂

Les émissions de CO₂ à l'échappement sont calculées à l'aide des facteurs d'émissions fournis par le JRC (JRC, 2020), liés à la stœchiométrie de la combustion. Ces facteurs sont indiqués dans le Tableau 26 : facteurs d'émissions de CO₂ liées à la combustion des différents vecteurs énergétiques

Tableau 26 : facteurs d'émissions de CO₂ liées à la combustion des différents vecteurs énergétiques

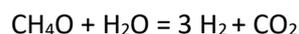
	g CO ₂ /MJ
GNR	73,2
B100	76,2
GtL, HVO, BtL	70,8
GNC	56,4
Bio-GNC	56,7
biométhanol	68,9

Piles à combustible (PAC)

L'utilisation d'une PAC induit des fuites d'hydrogène liées à des purges et à la ventilation nécessaires au bon fonctionnement du système. Ces fuites peuvent varier entre environ 1% et 3% de la masse d'hydrogène consommée⁹. Or, la question du pouvoir de réchauffement global de l'hydrogène est de plus en plus abordée avec l'ampleur du développement des solutions hydrogène : par des mécanismes limitant la dégradation de certains gaz à effet de serre dans l'atmosphère, comme le CH₄, l'hydrogène peut participer indirectement à l'effet de serre, avec un pouvoir de réchauffement global (PRG) estimé autour de 11 kg CO₂eq./kg H₂ d'après les travaux les plus récents (département britannique de l'Economie, de l'Énergie et de la Stratégie industrielle (Warwick, et al., 2022)).

Un calcul avec l'hypothèse d'un taux de fuite à 3% pour les architectures à PAC en 2035 et un PRG à 11 kg CO₂eq./kg H₂ montre que ces fuites peuvent représenter jusqu'à 5% du bilan GES des différents bateaux, ce qui peut être considéré comme négligeable.

Enfin, l'utilisation du biométhanol (formule chimique méthanol : CH₄O) avec l'architecture PAC implique une réaction de reformage pour le convertir en hydrogène, selon l'équation :



Soit 101,8 g d'eau consommée et 248,7 g CO₂ émis par kWh de biométhanol reformé. La modélisation de l'étape de reformage se résume à la seule prise en compte de ces consommations d'eau et émission de CO₂ (comptabilisée dans la phase TTW), i.e. les équipements d'un reformeur ne sont pas modélisés, faute de données et au regard de l'incidence négligeable escomptée sur les résultats de l'ACV.

⁹ <https://www.h2-mobile.fr/actus/hydrogene-ces-fuites-qui-plombent-bilan-carbone/>

6.4 Résultats d'impacts environnementaux (automoteurs)

Pour des questions de facilité de lecture et pour des raisons de similitude entre l'analyse des différents bateaux, les résultats d'impacts sont illustrés et détaillés pour la famille « automoteur ».

L'ensemble des résultats par application et par horizon de temps, ainsi qu'un récapitulatif de l'évolution de l'impact sur le changement climatique de chaque application en fonction du mix de consommation moyen paramétrable en biocarburant (% HVO, B100 et BtL) et en gaz (% GNC et bio-GNC) sont disponibles directement dans l'outil Excel.

La liste des paramètres variables dans l'outil Excel est donnée dans le Tableau 27. Un exemple de récapitulatif des résultats d'impact sur le changement climatique pour des mix énergétiques arbitraires est présenté en Figure 52.

Tableau 27 : liste des paramètres variables dans l'outil Excel

Catégorie	Paramètres
Durées de vie	Groupe motopropulseur, batteries Li-ion, PAC
Utilisation des bateaux	tkm par an, pkm par an, heures de circulation par an
Mix énergétiques	Source/mix électrique pour la production d'hydrogène, l'alimentation des bateaux électriques, l'alimentation des bornes électriques à quai (2035+) Mix moyen de consommation de biocarburants (% HVO, B100 et BtL) par les flottes fluviales Mix moyen de consommation de gaz (% GNC et bio-GNC) par les flottes fluviales
Consommation de bord	Prise en compte dans les résultats (oui/non), besoin net (kW), % du temps à quai nécessitant une consommation de bord, mix électrique 2050

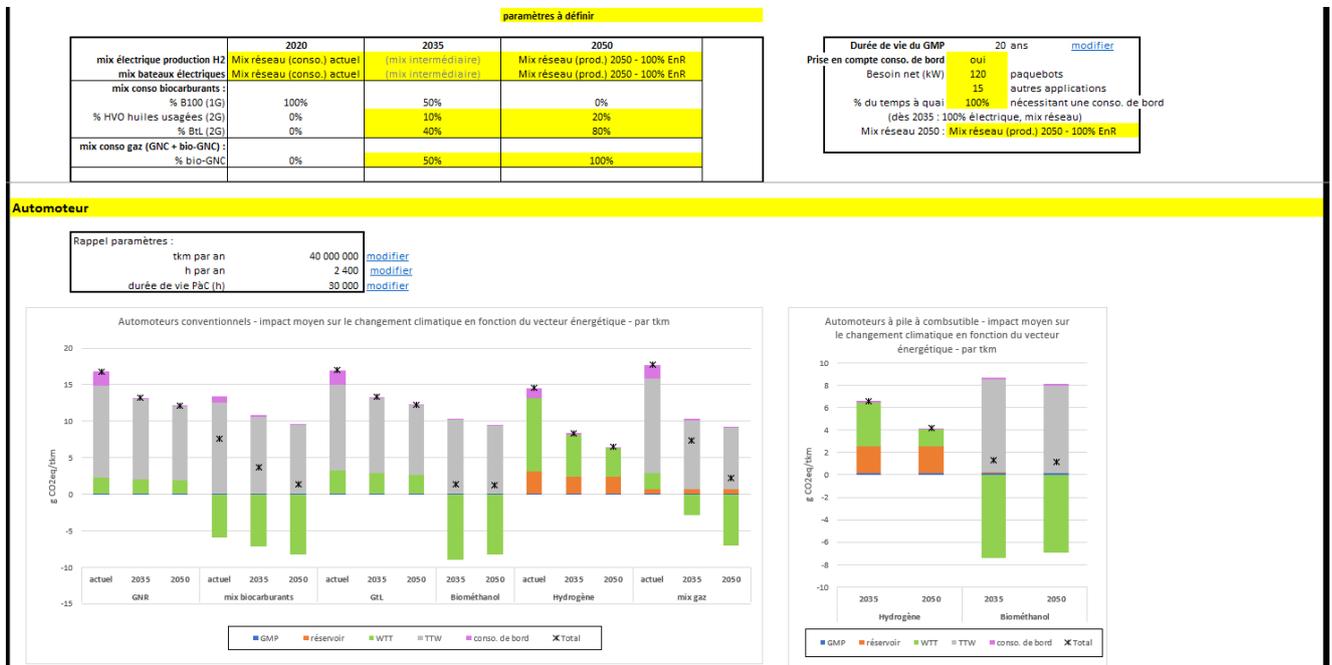


Figure 52 : récapitulatif des résultats d'impact sur le changement climatique pour des mix énergétiques donnés – exemple de sortie de l'outil Excel développé dans le cadre de l'étude

6.4.1 Impact sur le changement climatique

La Figure 53 illustre l'impact des automoteurs sur le changement climatique à l'horizon actuel, la Figure 54 présente les résultats à horizon 2050. Par défaut, le mix électrique prospectif « 100% EnR » (voir section 6.3.3.10) est sélectionné pour 2050. Les résultats à 2035 présentent des tendances similaires à 2050 et des valeurs intermédiaires, que l'on pourra retrouver dans l'outil Excel.

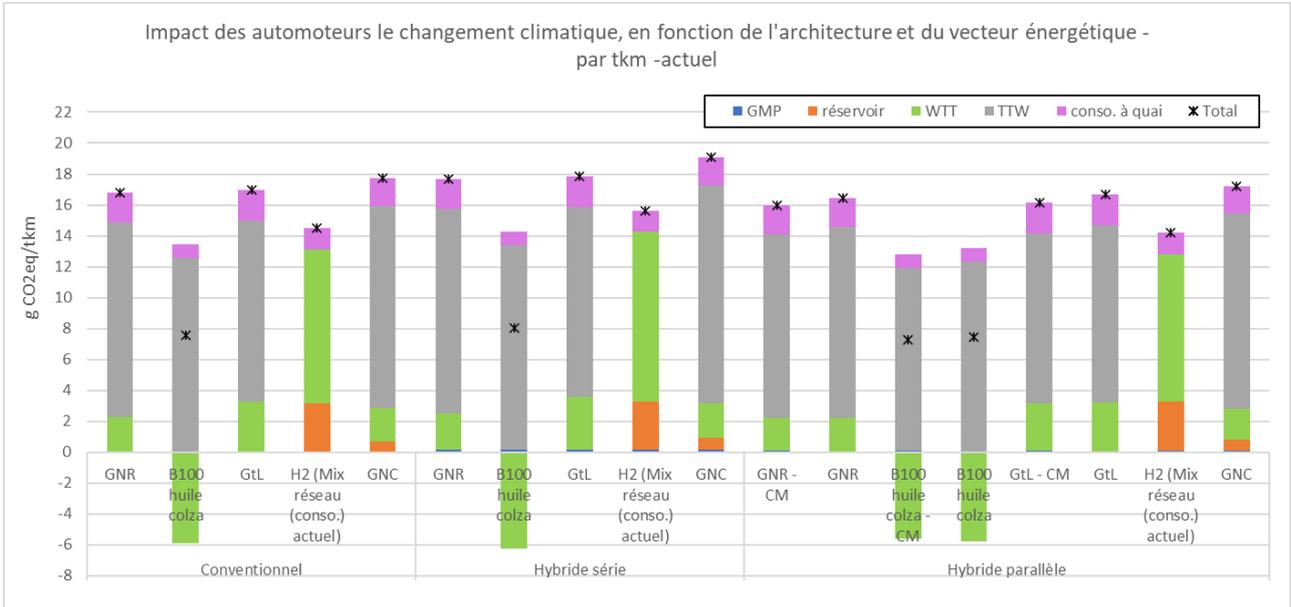


Figure 53 : Impact des automoteurs sur le changement climatique à l'horizon actuel (par tkm)

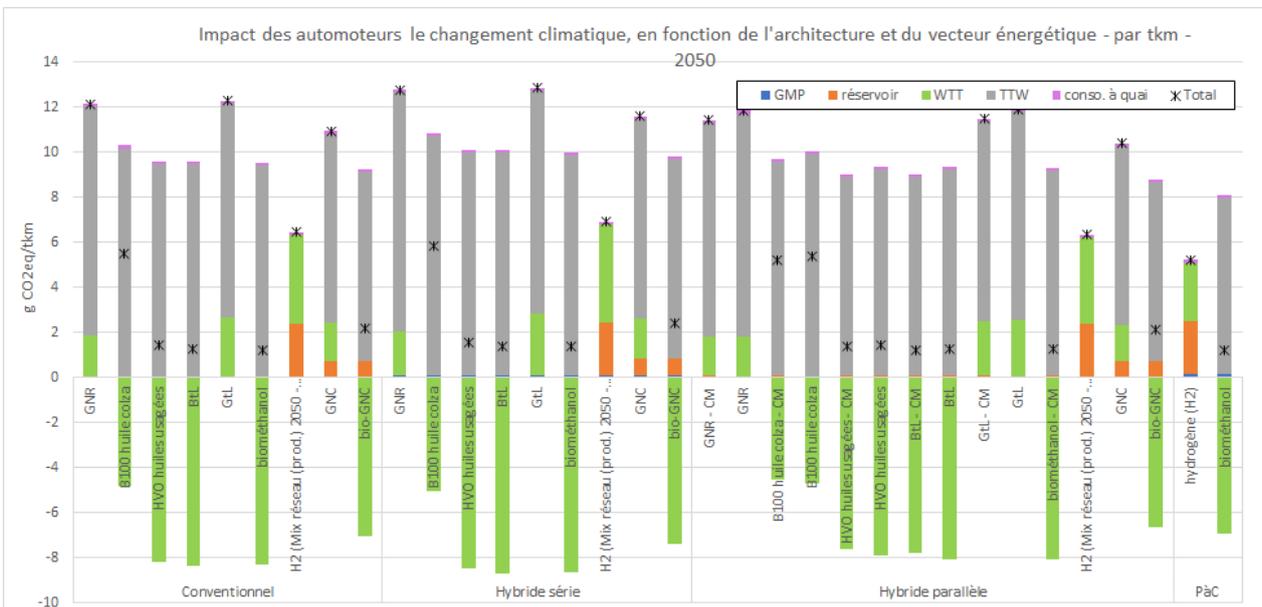


Figure 54 : Impact des automoteurs sur le changement climatique à l'horizon 2050 (par tkm)

Le bilans GES des différentes configurations (architecture + vecteur) s'élève au maximum autour de 20 g CO₂eq./tkm à l'horizon actuel ; à titre d'exemple, le transport de marchandises par camion diesel (en supposant des marchandises de nature similaire à celles transportées par des automoteurs) peut représenter autour de 87 g CO₂eq./tkm (d'après le jeu de données Ecoinvent « Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO6 {RER} »). Par rapport au service rendu, le transport par automoteur semble donc bien plus avantageux, à plus forte raison pour des configurations alimentées par des vecteurs moins émetteurs que le GNR.

On constate tout d'abord que pour un même vecteur énergétique, l'impact diffère très peu en fonction de l'architecture du groupe motopropulseur (GMP) : **l'hybridation n'est ni particulièrement bénéfique, ni pénalisante en termes d'impact sur le changement climatique**. En effet, la différence de consommation est relativement faible entre les différentes architectures (voir section 4 *Modélisation énergétique des bateaux*), ce qui se traduit par un impact similaire des phases d'approvisionnement (WTT) en chaque vecteur et des émissions de combustion (TTW). Ces dernières sont la principale source de GES pour les vecteurs d'origine fossile (GNR, GtL, GNC), ainsi que pour le B100, que la phase amont (WTT) compense toutefois du fait de l'absorption de CO₂ lors de la croissance de la biomasse. Ainsi, les émissions de CO₂ liées à la combustion du B100 sont neutres sur le climat (CO₂ biogénique), ce qui en fait l'option la plus favorable au climat à l'horizon actuel.

A l'inverse, **l'impact de la production et de la maintenance du GMP est négligeable**, y compris pour les architectures hybrides qui comportent notamment des batteries Li-ion incluant un remplacement de celles-ci sur les 20 ans de durée de vie du GMP. Cette observation contraste avec les ACV de solutions électrifiées pour le transport routier, dans lesquelles la contribution du cycle de vie de la batterie Li-ion aux émissions de GES apparaît souvent comme significative. De ce fait, les répercussions des améliorations technologiques telles de l'augmentation de la densité énergétique des batteries, la densité de puissance des PAC ou la diminution de leur teneur en platine (voir section 6.3.1) ne sont pas perceptibles. En revanche, en termes d'équipements, seul l'impact des réservoirs de carburants liquides est également insignifiant, tandis que celui des réservoirs de GNC est relativement faible (acier) et **l'impact des réservoirs à hydrogène est assez significatif**. La proportion de l'impact des réservoirs à hydrogène dans le bilan total associé à l'utilisation de ce vecteur est d'autant plus importante à l'horizon 2050, puisque la contribution de la phase d'approvisionnement en hydrogène diminue grâce à l'évolution vers un mix électrique moins carboné. L'impact des réservoirs à hydrogène est principalement dû à la fabrication de la fibre de carbone, à travers l'approvisionnement en matériaux et l'énergie requise pour sa synthèse. De plus, aucun procédé de recyclage effectif pour les matériaux composites de ce type n'existe à ce jour ; ces résultats encouragent donc la recherche de solutions dans ce sens.

L'utilisation de GtL ou de GNC génère des impacts similaires à ceux de l'utilisation de GNR. La combustion du GNC émet certes moins de CO₂ que celle du GNR par MJ consommé, mais les consommations en GNC sont légèrement supérieures, et les émissions de CH₄ (voir section 6.3.3.11) pénalisent le bilan GES de la phase TTW du GNC à l'horizon actuel. A horizon 2050, les améliorations techniques permettraient de diminuer cette contribution du CH₄ imbrûlé à 0,47 g CO₂eq./MJ GNC ; pour le bio-GNC, ces fuites représenteraient alors 0,42 g CO₂eq./MJ puisque le CH₄ d'origine biogénique a un impact légèrement inférieur sur le changement climatique (dû à la fraction qui se décompose en CO₂ biogénique, neutre sur le climat). En 2050, l'amélioration des rendements des moteurs thermiques (et donc la diminution proportionnelle des émissions de CO₂ de combustion) combinée au respect de normes d'émissions de CH₄ plus sévères (mentionné ci-dessus pour le GNC) permet de diminuer significativement le bilan GES des configurations utilisant ces vecteurs (-28% pour GNR et GtL, -38% pour GNC). Toutefois, leur utilisation reste au moins deux fois plus impactante que celle des vecteurs innovants.

A partir de 2035 et jusqu'en 2050, les configurations au biocarburant type BtL, HVO et biométhanol (incluant l'architecture PAC) présentent le bilan GES le plus avantageux, trois fois moins impactant que les configurations au B100. En effet, l'amont agricole (culture du colza) pour la production de B100 conventionnel pénalise son bilan par rapport à l'HVO ou au BtL qui utilisent de l'huile usagée ou du bois, respectivement. De plus, les procédés de production d'HVO et de BtL ou biométhanol sont optimisés sur le plan énergétique ; en particulier, la production de BtL et de biométhanol est auto-suffisante en énergie (voir section 6.3.3.3). Enfin, l'utilisation de biométhanol avec une architecture PAC donne un bilan GES équivalent à l'utilisation dans un moteur thermique – pour l'architecture hybride série le bilan est plus important en raison d'une consommation horaire supérieure à celle des autres architectures alimentées au biométhanol.

Les configurations au bio-GNC présentent un bilan GES similaire, également lié au cycle du carbone biogénique qui permet de compenser les émissions de CO₂ à l'échappement, et aux faibles impacts des procédés de production de biogaz. Ainsi, il semble judicieux voire impératif **d'envisager une complémentarité de ces différentes solutions, notamment pour tenir compte de la disponibilité des ressources** nécessaires à la production de chaque type de carburant : la disponibilité de cultures ou résidus de bois en Europe pour produire du BtL ou du méthanol, par exemple, est davantage garantie jusqu'en 2050 que la disponibilité d'huiles usagées pour produire de l'HVO avancé (Imperial College London Consultants, 2021).

Enfin, l'hydrogène est un vecteur intéressant pour réduire les émissions de GES par rapport aux carburants fossiles dans l'hypothèse d'un mix électrique 100% EnR à 2050 (un mix 50% nucléaire – 50% EnR donnerait un meilleur score).

A noter que le rendement pic des moteurs thermiques à hydrogène est pris à 48% à l'horizon 2050 (hypothèse relativement conservatrice) ; dans l'hypothèse d'un fort développement technologique et d'une bonne pénétration de cette technologie dans le secteur fluvial d'ici 2050, le rendement pourrait atteindre 52%. Ceci conduirait à une diminution de 4-5% des impacts GES des configurations à moteur thermique hydrogène.

La contribution de la consommation à quai au bilan GES total des différentes configurations est peu pénalisante à l'horizon actuel malgré l'utilisation de groupes électrogènes, et avec l'hypothèse d'une consommation requise pendant tout le temps passé à quai (pas toujours le cas en pratique). A plus forte raison, l'électrification des quais dès 2035 permet de réduire cette contribution à un niveau négligeable.

6.4.2 Impact sur la santé humaine dû à la formation de particules fines

La Figure 55 illustre l'impact des automoteurs sur la santé humaine dû à la formation de particules fines à l'horizon actuel, la Figure 56 présente les résultats à horizon 2050. Par défaut, le mix électrique prospectif « 100% EnR » (voir section 6.3.3.10) est sélectionné pour 2050. Les résultats à 2035 présentent des tendances similaires à 2050 et des valeurs intermédiaires, que l'on pourra retrouver dans l'outil Excel.

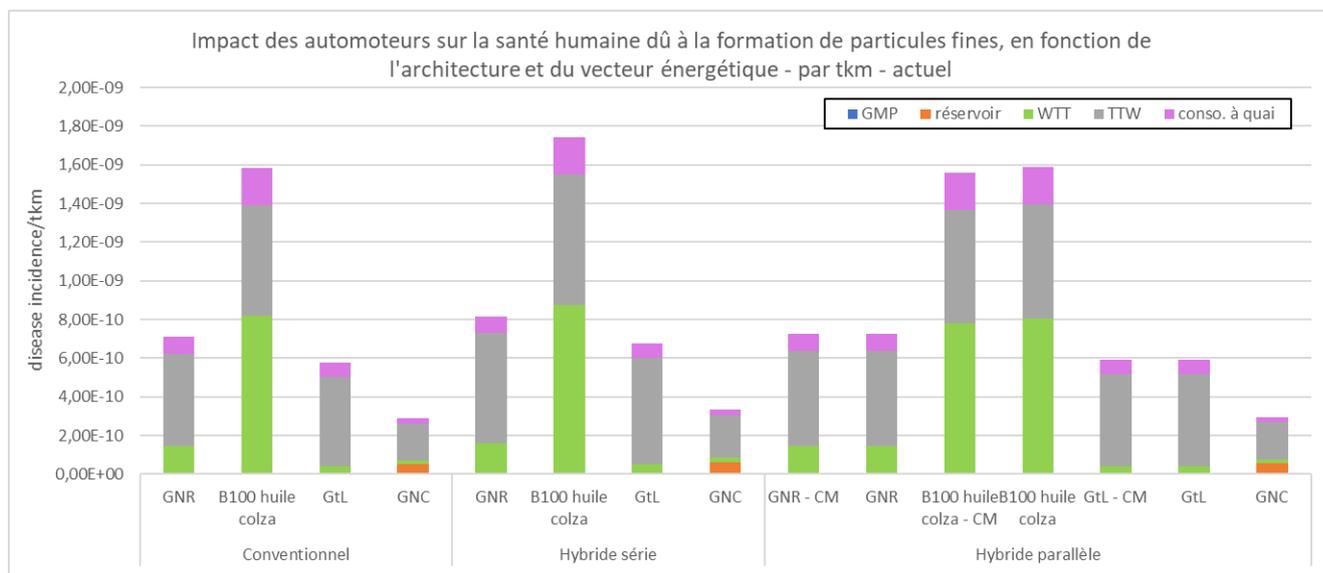


Figure 55 : Impact des automoteurs sur la santé humaine dû à la formation de particules fines à l'horizon actuel (par tkm)

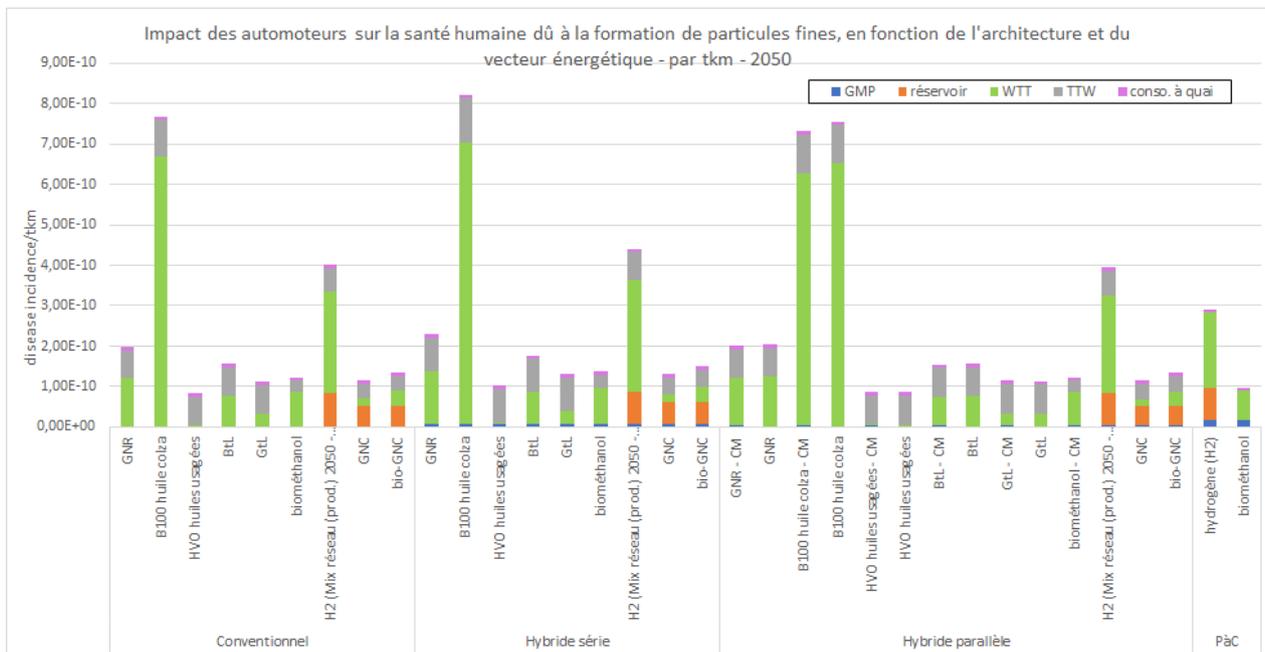


Figure 56 : Impact des automoteurs sur la santé humaine dû à la formation de particules fines à l'horizon 2050 (par tkm)

En termes de formation de particules fines (primaires et secondaires, via les émissions de NOx par exemple) et de répercussions sur la santé humaine, quelques tendances diffèrent par rapport à l'indicateur d'impact sur le changement climatique.

Le vecteur B100 est cette fois-ci le plus impactant, à l'horizon actuel et jusqu'en 2050. Ceci s'explique par la contribution de la phase d'approvisionnement en B100 (WTT) et plus particulièrement par l'amont agricole. En effet, les engrais azotés utilisés pour la production du colza induisent des émissions de NH₃ au champ, qui est le principal contributeur à la formation de particules fines (précurseur) liée à cette filière.

Les biocarburants type HVO, BtL et biométhanol présentent quant à eux un impact du même ordre que celui du GtL ou du GNC. Les émissions horaires de particules fines et de NOx liées à la combustion du GtL, de l'HVO et du BtL sont identiques (voir section 6.3.3.11), d'où un bilan TTW identique pour ces vecteurs. **De manière générale, les biocarburants ont un impact TTW similaire à celui du GNR,** surtout à cause des émissions horaires de NOx qui sont du même ordre voire potentiellement supérieures (B100) à celles du GNR. Seule l'utilisation de biométhanol (dans un moteur thermique comme dans une PAC) a un impact TTW quasiment nul, étant donné que sa combustion émet beaucoup moins de NOx et de particules que les autres biocarburants (d'après les hypothèses considérées en section 4.3.2), et que son reformage (architecture PAC) n'émet que du CO₂.

Concernant l'hydrogène, son utilisation dans un moteur thermique comme dans une PAC est à nouveau pénalisée par l'impact de la production du réservoir, également en lien avec la production de la fibre de carbone. Les réservoirs en acier pour le GNC et le bio-GNC représentent également une proportion importante de l'impact pour les configurations utilisant ces vecteurs. L'approvisionnement en hydrogène est également plus impactant que pour les autres vecteurs (sauf B100), à nouveau en raison des impacts de la production d'électricité pour l'électrolyse (la production des infrastructures pour exploiter l'énergie éolienne, photovoltaïque ou nucléaire engendre la formation de particules fines ou précurseurs, par exemple l'extraction de Silice et l'énergie requise pour l'assemblage de panneaux photovoltaïques). Enfin, la formation de particules fines liée aux émissions de la combustion de l'hydrogène (TTW) est quasi-exclusivement due aux émissions de NOx (on rappelle que les valeurs d'émissions maximales ont été considérées, soit des niveaux horaires équivalents à ceux de la combustion de GNR, voir section 6.3.3.11), tandis que les quantités de particules primaires émises sont négligeables par rapport aux autres vecteurs.

Le bio-GNC quant à lui est à peine plus impactant que le GNC à cause de la phase d’approvisionnement (WTT), la méthanisation de la biomasse (comme le lisier) requérant de la chaleur (fournie par la combustion de bois dans la présente modélisation) et générant des émissions de NH₃. Toutefois, le bilan total de formation de particules fines est quasi identique entre ces deux vecteurs gaz.

Enfin, l’impact de la fabrication du GMP est perceptible pour les architectures PAC (extraction des métaux pour la production des électrodes des batteries et du platine pour la PAC), mais reste négligeable en termes de contributions à l’impact total.

6.4.3 Impact sur l’écotoxicité aquatique

La Figure 57 illustre l’impact des automoteurs sur l’écotoxicité aquatique à l’horizon actuel, la Figure 58 présente les résultats à horizon 2050. Par défaut, le mix électrique prospectif « 100% EnR » (voir section 6.3.3.10) est sélectionné pour 2050. Les résultats à 2035 présentent des tendances similaires à 2050 et des valeurs intermédiaires, que l’on pourra retrouver dans l’outil Excel.

On rappelle que cet indicateur est peu robuste par rapport aux précédents indicateurs et que les ordres de grandeur des écarts entre les différents résultats sont à interpréter avec précaution (par exemple, un rapport 10 entre deux résultats permet de constater qu’une configuration est potentiellement plus néfaste qu’une autre, mais pas forcément de façon significative).

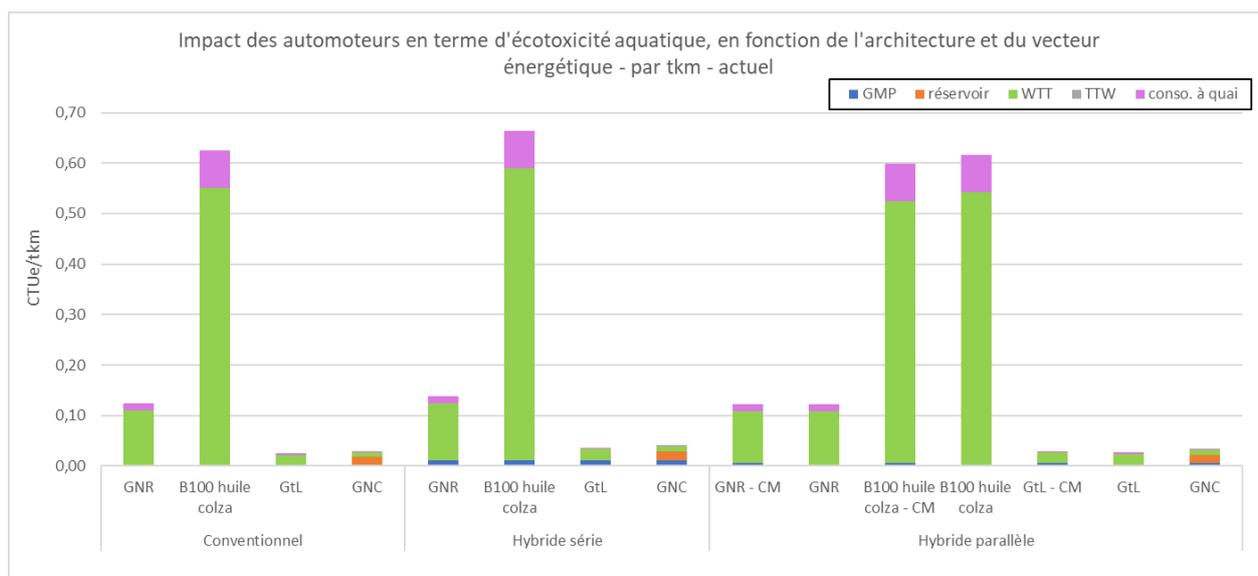


Figure 57 : Impact des automoteurs sur l’écotoxicité aquatique à l’horizon actuel (CTUe = Unité comparative de toxicité équivalente par tkm)

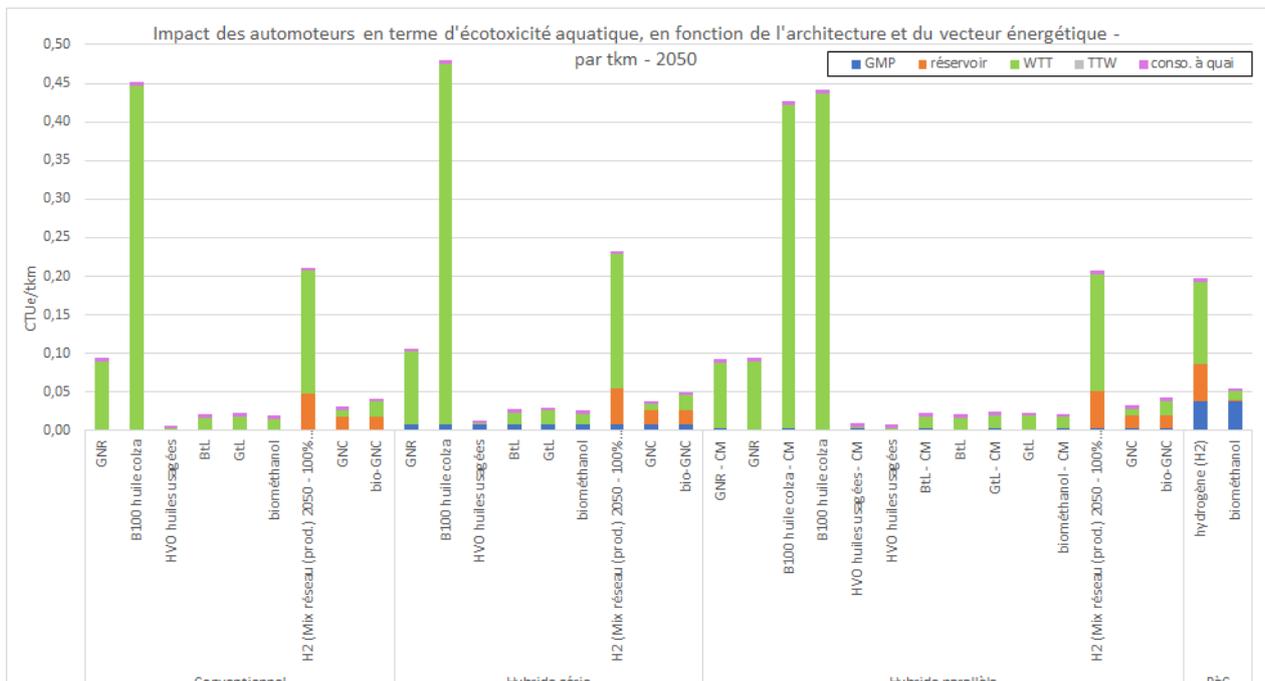


Figure 58 : Impact des automoteurs sur l'écotoxicité aquatique à l'horizon 2050 (par tkm)

Dans cette catégorie d'impact, le B100 est à nouveau le vecteur le plus défavorable, en lien avec les engrais (K_2O) utilisés pour la culture du colza, dont la fabrication émet du soufre et des composés chlorés vers l'eau. Les configurations au GNR, au GtL et au GNC sont moins pénalisées par l'approvisionnement en carburant (risques d'écotoxicité pour les milieux aquatiques à proximité des sites d'extraction de pétrole ou de gaz naturel par exemple, via les eaux déchargées ou l'épandage des déchets de forage qui contiennent des métaux comme l'aluminium). L'utilisation des biocarburants type BtL, HVO, biométhanol et de bio-GNC présentent de même peu de risques d'écotoxicité aquatique. Enfin, la production d'hydrogène est impactée par la production d'électricité pour l'électrolyse, encore une fois via la production des équipements pour l'exploitation des EnR tels que les panneaux photovoltaïques.

En revanche, la phase d'utilisation (TTW) des différents vecteurs ne génère aucun impact écotoxique pour les milieux aquatiques, dans la mesure où aucune substance écotoxique n'est émise dans l'eau des fleuves, ni ne s'y retrouve. En effet, les émissions de CO et d'hydrocarbures (HC) imbrûlés à la combustion des carburants peuvent avoir un effet écotoxique, mais ce dernier est insignifiant au vu des quantités émises et des fractions qui se retrouvent *in fine* dans l'eau. On rappelle également que les fuites de carburant potentiellement consécutives d'un accident ou d'une défaillance de l'étanchéité des systèmes ne font pas partie du périmètre de cette catégorie d'impact (voir section 6.2.5).

Enfin, hormis les impacts de la fabrication des réservoirs en composite fibre de carbone pour l'hydrogène et en acier pour le (bio-)GNC qui ressortent également dans cette catégorie, le GMP des architectures PAC présente une contribution assez significative à l'impact de ces configurations (alimentation hydrogène ou méthanol + reformage) à travers l'impact de l'extraction du platine pour la production et la maintenance de la PAC. L'extraction de platine nécessite en effet l'utilisation d'explosifs, ce qui relâche notamment de l'aluminium vers l'air (qui peut ensuite se déposer dans les milieux aquatiques voisins et nuire aux espèces présentes). Les impacts supplémentaires de l'architecture PAC par rapport aux autres architectures conduisent à un bilan similaire entre les différentes configurations utilisant l'hydrogène (voir Figure 58) malgré la consommation horaire d'hydrogène plus faible pour les PAC.

6.4.4 Autres applications

Concernant les quatre autres applications étudiées (pousseurs de ligne, pousseurs urbains, paquebots et promenades), les tendances des résultats à chaque horizon de temps et dans chaque catégorie d'impact sont les mêmes que pour les automoteurs, à l'exception des **paquebots et des promenades pour lesquels la consommation à quai représente une proportion beaucoup plus importante des impacts** (voir exemple des promenades à l'horizon actuel en Figure 59). Pour les paquebots, cette contribution est due à un besoin à bord plus important (voir le Tableau 23), et l'électrification des quais dès 2035 permet de réduire significativement la contribution de cette phase aux impacts des différentes configurations. Pour les promenades, la consommation à quai prend une proportion essentielle des impacts à l'horizon actuel, et encore importante jusqu'en 2050 malgré l'électrification, à cause du temps important passé à. On rappelle toutefois que la consommation de bord a été considérée sur tout le temps passé à quai, ce qui n'est pas toujours le cas en pratique, et que les heures de navigation par an sont fixées sur une valeur par défaut et sont paramétrables dans l'outil Excel.

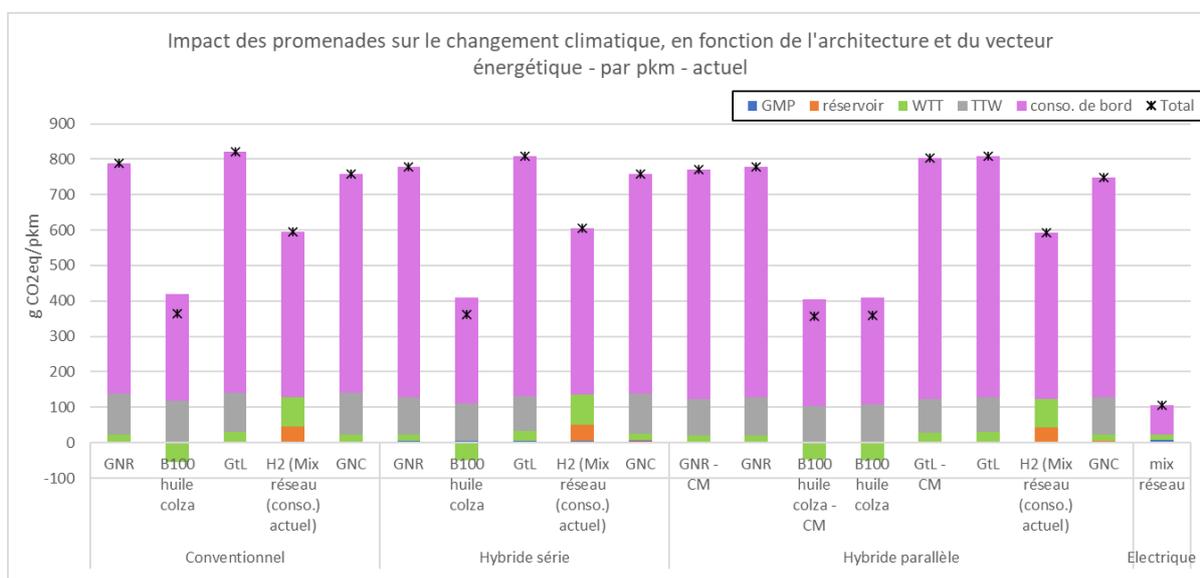


Figure 59 : Impact des promenades sur le changement climatique à l'horizon actuel (par pkm)

Du reste, les ordres de grandeur des résultats absolus varient d'une application à l'autre, en lien avec les usages différents (transport de personnes ou de marchandises, heures de circulation par an, tonnage de marchandises ou passagers transportés par an). Ainsi, le transport de marchandises par automoteurs est le moins impactant par tkm transportée, suivi du transport par pousseur de ligne. Les pousseurs urbains présentent des impacts environ 10 fois plus importants que les pousseurs de ligne par tkm transportée (les deux applications étant comparables si elles transportent le même type de marchandises) malgré des consommations horaires 10 fois plus faibles (voir section 4 Modélisation énergétique des bateaux), étant donné leur capacité de chargement 100 fois plus faible (200 000 tkm/an contre 20 000 000 tkm/an pour les pousseurs de ligne avec les hypothèses par défaut du Tableau 22). Enfin, pour les pousseurs urbains et les promenades, les impacts des GMP sont perceptibles sur les résultats graphiques, mais restent toutefois faibles par rapport aux impacts des autres phases.

Par ailleurs, les applications pousseur urbain et promenade incluent la possibilité d'une architecture 100% électrique (voir outil Excel) qui donne le meilleur bilan GES à l'horizon actuel (donc avec le mix électrique du réseau actuel) et reste l'une des architectures les plus favorables jusqu'en 2050 avec les configurations au biométhane (combustible ou reformage + PAC). Dans les autres catégories d'impact (formation de particules fines et écotoxicité aquatique), l'architecture 100% électrique demeure pertinente malgré les impacts de la batterie Li-ion et ses remplacements.

Les principaux constats tirés de l'analyse des impacts environnementaux des différentes applications sont résumés dans le Tableau 28.

Tableau 28 : Résumé de l'analyse des impacts environnementaux liés aux différentes familles de bateaux

	Automoteur	Pousseur de ligne	Pousseur urbain	Paquebot	Promenade
Diminution des impacts pour une configuration donnée entre horizons actuel et 2050	X	X	X	X	X
Impacts équivalents entre conventionnel, hybride série et hybride parallèle	X	X	X	X	X
PAC + hydrogène avantageux // combustion hydrogène (changement climatique)	X	X	X	X	X
Consommation à quai prépondérante				X	X
Impacts GMP négligeables (sauf écotoxicité pour architectures électrifiées)	X	X	X	X	X
Impacts réservoirs hydrogène importants	X	X	X	X	X
Configurations au biocarburant (sauf B100) et au biogaz les + favorables	X	X	X	X	X
Source d'électricité pour la production d'hydrogène déterminante	X	X	X	X	X

6.5 Limites de l'étude

L'interprétation des résultats de la présente étude ACV est conditionnée par les paramètres en jeu et les incertitudes associées. Ainsi, les grandes tendances observées sont relativement valides, mais les résultats absolus doivent être appréciés en tenant compte des données d'arrière-plan considérées (par exemple, filière d'approvisionnement moyenne en bio-GNC, filière BtL pour produire du biodiesel avancé, chimie NMC-622 pour les batteries Li-ion modélisée avec des données de littérature et une densité d'énergie moyenne etc.), mais aussi des valeurs des différents paramètres liés à l'exploitation des bateaux (tkm ou pkm par an, profils de mission, heures de navigation par an, consommations à quai, durées de vie des équipements etc.). Les impacts liés à la réduction d'autonomie et la perte de volume de marchandises transportées pour certaines solutions de propulsion n'ont pas été investigués dans la présente étude mais seront étudiés et remis à jour par la suite. La plupart des paramètres liés à l'exploitation peuvent toutefois être manipulés dans l'outil Excel afin de vérifier leur influence sur les résultats absolus (voir aussi Tableau 27).

De même, les données d'usage et les résultats de consommations et d'émissions de polluants de la phase 3 constituent des estimations. La prise en compte des polluants locaux en sortie d'échappement, et la projection de leur réduction à horizons lointains demeurent une source importante d'incertitude.

6.6 Conclusion

L'Analyse Cycle de Vie des différentes solutions de propulsion des bateaux de la flotte Rhône-Saône a permis de rendre compte des impacts environnementaux en considérant un périmètre plus large que le cadre « réservoir à l'hélice » habituellement employé pour traiter les impacts du secteur du transport fluvial. L'analyse a ainsi permis de dégager des tendances pouvant orienter le choix, sur le plan environnemental, de vecteurs énergétiques permettant de diminuer considérablement les impacts environnementaux globaux (changement climatique) et locaux (santé humaine et écosystèmes aquatiques) de chaque application à horizon 2050 par rapport aux configurations actuelles :

- Dans les trois catégories d'impact évaluées, l'amélioration des rendements moteurs et la diminution des seuils d'émissions de polluants, accompagnées de l'introduction de vecteurs innovants, peuvent permettre une **diminution significative des impacts environnementaux des flottes jusqu'en 2050**. De plus, **les différentes architectures de GMP donnent lieu à des impacts environnementaux similaires pour un vecteur donné** : ainsi, d'un point de vue environnemental, il n'y a ni bénéfice ni pénalité significative à passer d'une architecture conventionnelle à une architecture hybride.
- L'impact environnemental des différentes configurations se joue plutôt sur **l'amont** (approvisionnement des vecteurs, WTT) et l'utilisation (consommation et émissions horaires de GES et de polluants, TTW) des différents vecteurs (c'est-à-dire leur cycle de vie), faisant des **configurations au biocarburant type BtL, HVO ou biométhanol (incluant architecture PAC) ainsi que des configurations au bio-GNC les plus prometteuses à horizon 2050**. Le B100 conventionnel est certes le plus favorable à l'horizon actuel pour lutter contre le changement climatique, mais devient bien moins intéressant dès 2035, et peut causer davantage d'impacts que les autres biocarburants sur la formation de particules fines et les écosystèmes aquatiques à cause de l'amont agricole. **La pertinence du vecteur hydrogène est fortement conditionnée par la source d'électricité utilisée pour l'électrolyse, et pénalisée par l'impact de la fabrication des réservoirs à hydrogène** (en composite fibre de carbone).
 - o Il est également important de garder à l'esprit la **problématique complémentaire de disponibilité des ressources** pour produire de tels carburants à partir de biomasse. Notamment, l'approvisionnement pérenne en huiles usagées pour produire de l'HVO à faible empreinte environnementale est plus difficilement garanti que l'approvisionnement en bois (cultures durablement gérées ou résidus) pour produire du BtL ou du biométhanol.
 - o Dans le même sens, il est judicieux d'envisager une **complémentarité des différentes solutions**, également en fonction de la disponibilité de ces carburants sur le marché pour le secteur fluvial et de leurs coûts. Ces aspects sont justement abordés dans la dernière phase de l'étude (section 7 *Projection et scénarii de verdissement de la flotte Rhône-Saône*)
- Pour le **transport de passagers** (paquebots et promenades), la **consommation à quai peut également représenter une part déterminante de l'impact environnemental** des différentes configurations en plus du cycle de vie des vecteurs. Cependant, **l'électrification des quais dès 2035 permet de réduire significativement ces impacts**.

6.7 Références de l'analyse environnementale

- ADEME. (2019). *Efficacité énergétique et environnementale du transport fluvial de marchandises et de personnes*.
- ADEME, Bodineau & Sacher. (2020). *RENDEMENT DE LA CHAÎNE HYDROGÈNE - Cas du "power-to-H2-to-power"*.
- Agostini, A., Belmonte, N., Masala, A., Hu, J., Rizzi, P., Fichtner, M., . . . Baricco, M. (2018). Role of hydrogen tanks in the life cycle assessment of fuel cell-based auxiliary power unit. *Applied Energy*, 215, pp. 1-12.
- Battery University. (s.d.). *BU-216: Summary Table of Lithium-based Batteries*. Récupéré sur [batteryuniversity.com](https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_216_summary_table_of_lithium_based_batteries):
https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_216_summary_table_of_lithium_based_batteries
- Benitez, A., Wulf, C., de Palmenaer, A., Lengersdorf, M., Röding, T., Grube, T., . . . Kuckshinrichs, W. (2021). Ecological assessment of fuel cell electric vehicles with special focus on Type IV carbon fiber hydrogen tank. *Journal of Cleaner Production*, 278(123277).
- Burkhardt, J., Patyk, A., Tanguy, P., & Retzke, C. (2016). Hydrogen mobility from wind energy - A life cycle assessment focusing on the fuel supply. *Applied Energy*, 181, pp. 54-64.
- CEA. (2015). *PROMOVAN : Analyse énergétique et d'usage de bateaux de transport fluvial*.
- CESNI. (2017). *European Standard laying down Technical Requirements for Inland Navigation vessels - ESTRIN*.
- Evangelisti, S., Tagliaferri, C., Brett, D. J., & Lettieri, P. (2017). Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell for passenger vehicles. *Journal of Cleaner Production*, pp. 4339-4355.
- Fazio, S., Biganzioli, F., De Laurentiis, V., Zampori, L., Sala, S., & Diaconu, E. (2018). *Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods, version 2, from ILCD to EF 3.0*. EUR 29600 EN, European Commission, Ispra. doi:10.2760/002447
- Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., & Klüppel, H.-J. (2006, January 25). The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11, 80-85. doi:<https://doi.org/10.1065/lca2006.02.002>
- Goellner, J. F., Shah, V., Turner, M. J., Kuehn, N. J., Littlefield, J., Cooney, G., & Marriott, J. (2013). *Analysis of Natural Gas-to-Liquid Transportation Fuels via Fischer-Tropsch*. NETL, Energy Sector Planning and Analysis.
- IFPEN/ADEME. (2022). *Etude Energétique, Economique et Environnementale du Transport routier français à l'horizon 2040*.
- IFSTTAR / AME / LTE. (2015). *Rapport d'étude PROMOVAN*.
- Imperial College London Consultants. (2021). *Sustainable biomass availability in the EU, to 2050*. Récupéré sur <https://www.fuelseurope.eu/publication/sustainable-biomass-availability-in-the-eu-to-2050/#:~:text=%E2%80%9CSustainable%20biomass%20availability%20in%20the,more%20than%20sufficient%20to%20supply>
- JRC. (2020). *JEC Well-to-Tank report v5 - Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context*. doi:10.2760/959137
- Majeau-Bettez, G., Hawkins, T. R., & Strømman, A. H. (2011). Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 45, 4548–4554. doi:[dx.doi.org/10.1021/es103607c](https://doi.org/10.1021/es103607c)
- Miotti, M., Hofer, J., & Bauer, C. (2017). Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles. *Journal of Life Cycle Assessment*, pp. 94-110.
- Mobilité, F. H. (2020). *Quelles perspectives pour le poids lourd électrique à hydrogène pour le transport de marchandises?*
- Parlement Européen. (2018). *DIRECTIVE (UE) 2018/2001 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables (refonte)*. PARLEMENT EUROPÉEN.
- Ricardo. (2020). *Fuel Cell: a sustainable clean solution for long haul commercial vehicles*.

- RTE. (2021). *Futurs énergétiques 2050. Principaux résultats*. Récupéré sur <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques#Lesdocuments>
- Stichting Projecten Binnenvaart. (2016). *prominent D1.1 List of operational profiles and fleet families*.
- T&E. (2018). *Electric buses arrive on time*.
- Warwick, N., Griffiths, P., Keeble, J., Archibald, A., Pyle, J., & Shine, K. (2022). *Atmospheric implications of increased Hydrogen use*. University of Cambridge and NCAS, University of Reading. Récupéré sur https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1067144/atmospheric-implications-of-increased-hydrogen-use.pdf

7 Projection et scénarii de verdissement de la flotte Rhône-Saône

Dans les phases précédentes de l'étude, le périmètre se limite à un unique bateau dont on cherche à estimer les performances énergétiques, économiques et environnementales. Mais dans un souci d'optimisation des performances de **la flotte globale sur le bassin Rhône Saône** et ainsi de planification des investissements et infrastructures nécessaires à la transition, il est important de raisonner non pas à l'échelle d'une unité fluviale mais à l'échelle de la flotte du bassin Rhône-Saône.

Grâce à une optimisation des performances du bassin basée sur les indicateurs TCO et ACV, il est possible de déterminer, aux horizons 2035 et 2050, les évolutions de compositions nécessaires de la flotte selon différents scénarii de contraintes.

7.1 Situation actuelle sur le bassin Rhône-Saône

7.1.1 Organisation du bassin

Le recensement réalisé par la CRMT en 2020 sert de référence pour estimer la composition du bassin Rhône-Saône aujourd'hui. La Figure 60 montre la répartition des bateaux sur le bassin, par familles de bateaux, en termes de nombre d'appareils, de consommation de carburant (uniquement du GNR) et d'émissions de CO₂ à l'échappement – pour 155 bateaux pour lesquels des informations ont pu être collectées parmi les 191 navigant sur le bassin

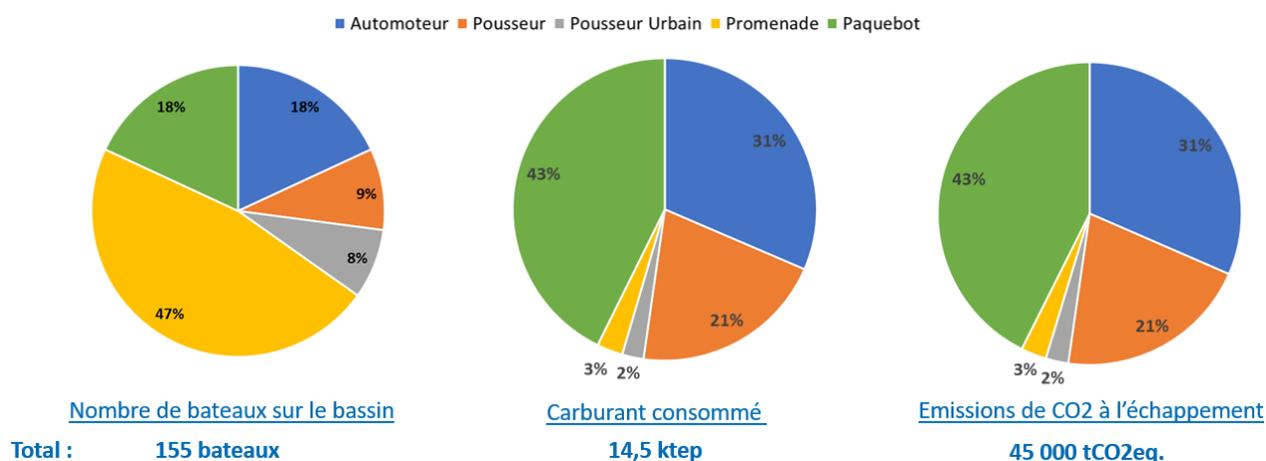


Figure 60 : Organisation du bassin Rhône-Saône, d'après le recensement CRMT 2020

La quasi-intégralité des bateaux sont équipés de groupes motopropulseurs d'architecture conventionnelle fonctionnant au diesel (voir section 2).

7.1.2 Electrification de la recharge à quai

La consommation d'énergie des bateaux hors des heures de navigation a été prise en compte dans les phases économique et environnementale. Cette consommation à quai est actuellement assurée par les groupes électrogènes embarqués à bord des bateaux et se traduit donc par une consommation de GNR très émetteur de GES.

VNF œuvre actuellement à l'électrification de cette consommation par le déploiement de bornes électriques sur les quais du bassin. Il est donc considéré qu'à partir de 2035 la consommation à quai sera électrique, ce qui permet un gain notable, tant en termes d'émissions de GES (-38% en sur le périmètre ACV entre 2020 et 2050) que de dépense économique (gain de 38% entre 2020 et 2050 sur la dépense économique consacrée à la consommation à quai), comme le montre la Figure 61.

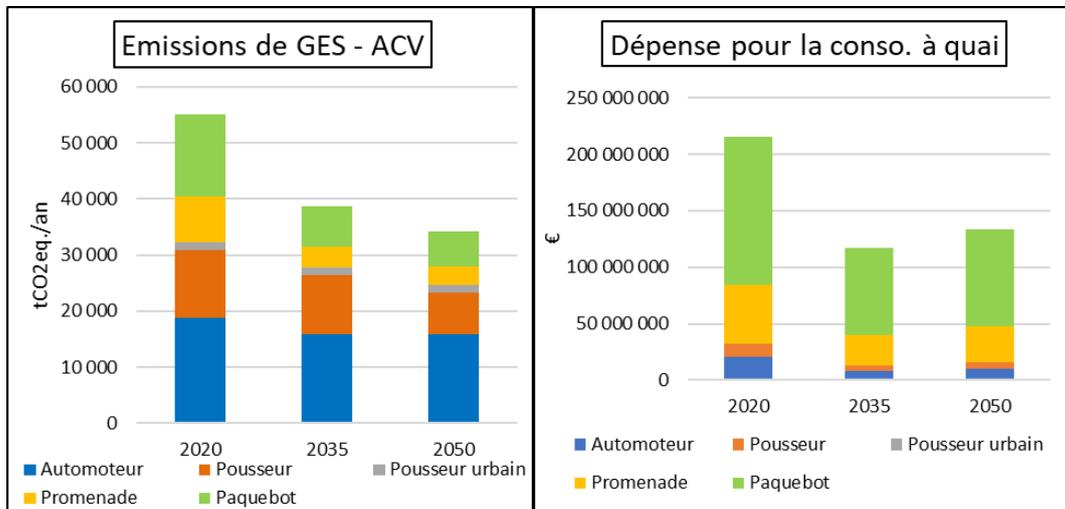


Figure 61 : Influence de l'électrification de la consommation à quai sur le bilan ACV et TCO

7.2 Méthodologie de la projection de la flotte

7.2.1 Les scénarios retenus

Trois scénarios ont été retenus afin de réaliser l'exercice de projection de la flotte aux horizons temporels 2035 et 2050 :

- **BAU** : « Business As Usual ». Ce premier exercice vise à observer l'évolution « naturelle » de la flotte selon une logique uniquement économique. Ainsi les solutions qui ressortent en 2035 et 2050 sont celles permettant de minimiser le coût total de la flotte (sur la base du TCO).
- **NC2050** : « Neutralité Carbone 2050 ». Une contrainte sur les émissions de GES est imposée aux horizons 2035 et 2050, comme il a été défini au niveau européen par la déclaration de Mannheim [58] : -35% d'émissions en 2035 et -90% d'émissions en 2050. On détermine ainsi les types d'architectures et de vecteurs permettant d'atteindre la neutralité carbone en 2050 et le coût économique de cette transition.
2 sous-scénarios sont considérés avec cette approche : « NC2050 – Echap » qui impose les contraintes sur les émissions uniquement à l'échappement, et « NC2050 – ACV » qui englobe tout le périmètre ACV des bateaux dans la prise en compte des contraintes de réduction des émissions de GES. Les émissions de gaz à effet de serre sont, dans chaque sous-scénario, quantifiées sur le périmètre contraint ainsi que le périmètre non-contraint.
- **H2PUSH** : Favorable à l'hydrogène. Ce scénario permet de visualiser l'évolution de la flotte si les performances économiques de l'hydrogène sont améliorées : grâce à un investissement massif et l'implication de nombreux acteurs industriels sur le territoire, le prix de l'H2 chute plus rapidement que dans les projections standards et les coûts des technologies baissent grâce à une maturation technologique et industrielle accélérée. On impose également un point de passage des émissions de GES à -35% en 2035 (réglementation européenne). Une optimisation économique de la flotte est réalisée sur cette nouvelle base, et l'évolution des émissions de GES sur le bassin est quantifiée.

La situation sur le bassin issue du recensement de la CRMT sert de référence pour calculer les émissions de GES actuelles, par rapport auxquelles les objectifs de réduction cités dans les différents scénarios seront calculés.

7.2.2 Optimisation sous contraintes

Le déploiement des scénarios est réalisé grâce à la résolution d'un problème d'optimisation non linéaire, dont la cible est toujours l'optimisation du TCO sur la flotte. En raison de l'indisponibilité de l'information sur le TCO du périmètre complet pour certaines familles de bateaux (coût de la coque et des commodités) et par soucis d'homogénéité entre les familles de bateaux, le TCO est considéré uniquement dans le cadre d'une remotorisation.

Des contraintes sont ensuite appliquées, certaines partagées par l'ensemble des scénarios et d'autres propres à chaque scénario :

- Contraintes partagées :
 - La somme des bateaux par famille sur le bassin est égale aux projections réalisées par VNF sur l'estimation de l'évolution du nombre d'unités sur le bassin, détaillée en Annexe 7.5.1.
 - Le renouvellement du groupe motopropulseur est possible à chaque horizon temporel (2035 et 2050) ce qui correspond à une simplification par rapport à la réalité où l'ensemble de la flotte n'est pas renouvelée tous les 15 ans. Il serait intéressant dans de futurs exercices de projection d'intégrer une loi de survie modélisant un renouvellement progressif des bateaux sur le bassin, comme c'est souvent le cas dans les exercices prospectifs propres au secteur routier. BAU : pas de contrainte sur les émissions GES
 - H2PUSH : -35% émissions GES à l'échappement en 2035.
 - NC2050 : -35% émissions GES en 2030, -90% en 2050 (à l'échappement ou en ACV) + disparition des architectures conventionnelles en 2050 pour permettre la navigation par propulsion électrique dans les ZFE (qui devraient être étendues aux zones portuaires d'ici 2050).

7.3 Résultats

Le détail des consommations annuelles de carburants dans chaque scénario est disponible en Annexe 7.5.5. Les résultats concernent l'ensemble de la flotte sur le bassin Rhône-Saône et agrègent donc les différents indicateurs pour toutes les familles de bateaux.

7.3.1 Business as Usual (BAU)

La Figure 62 présente l'évolution de la consommation d'énergie dans le scénario « Business As Usual ». On y voit que dès 2035 la logique de minimisation économique entraîne une disparition du GNR, qui est remplacé par du biogaz pour toutes les familles de bateaux à l'exception du bateau de promenade où le B100 est plus intéressant. La disparition du GNR s'explique par la hausse du TCO des configurations GNR, d'une part car dès 2035 tous les bateaux sont équipés de moteur Stage V auquel on ajoute un système de post-traitement des gaz d'échappement tandis qu'il n'y a pas d'évolution temporelle de la technologie moteur pour les solutions gaz et biocarburants. D'autre part le prix du diesel augmente en continue sur la période 2022 – 2050 (voir le Tableau 21).

En 2050, la préférence pour le Biogaz se confirme pour les mêmes familles de bateaux, l'application « promenade » est convertie au BtL dont le prix au litre devient plus intéressant que le B100 à cet horizon temporel.

Le détail de l'évolution du TCO et des émissions de GES par famille de bateaux est disponible en Annexe 7.5.2. On observe que la simple optimisation économique permet une réduction de 85% des émissions de GES sur la période 2020-2050 en ACV, mais une réduction de seulement 37% à l'échappement, puisque le biogaz, majoritaire dans ce scénario, présentent un bon bilan sur le périmètre ACV mais produit d'importantes émissions de GES à l'échappement.

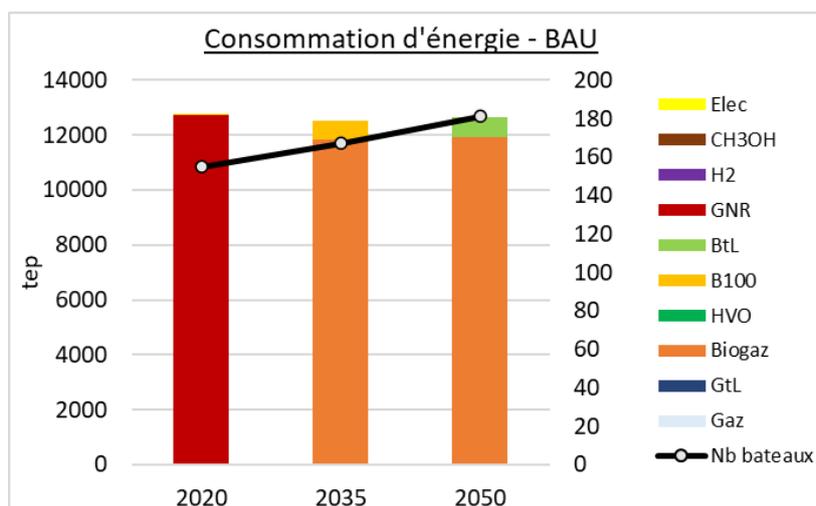


Figure 62 : Consommation d'énergie aux trois horizons temporels, scénario BAU

L'optimisation économique permet une réduction significative du TCO (-37% entre 2020 et 2050) permise d'une part par le recours au biogaz mais également par l'électrification de la recharge à quai. La Figure 63 permet de visualiser la contribution de la consommation en navigation (violet) et de la consommation à bord dans la réduction du TCO. Le terme « biogaz » désigne le bio GNC dans l'ensemble du rapport.

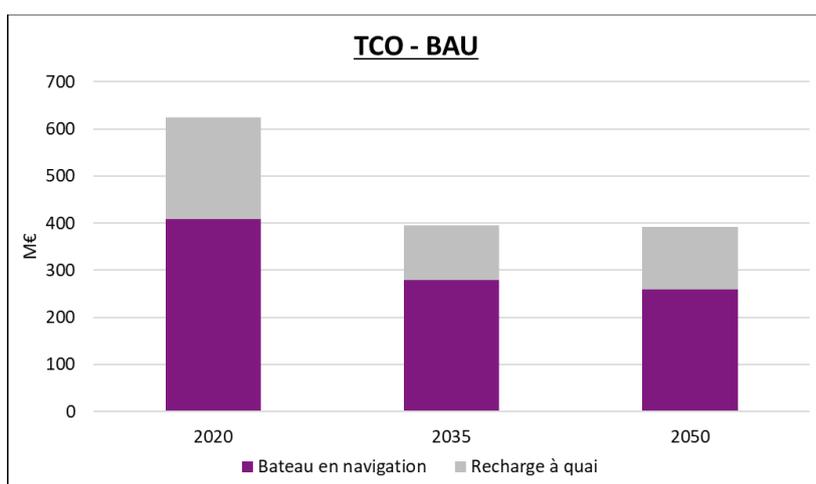


Figure 63 : Evolution du TCO de la flotte dans le scénario Business As Usual

7.3.2 Neutralité carbone 2050

La déclaration de Mannheim fixe en 2018 les objectifs de décarbonation du secteur du transport fluvial européen, avec une cible de réduction de 35% des émissions de GES à l'échappement en 2035 et 90% en 2050, par rapport à 2015. L'année de référence considérée ici n'est pas 2015 mais 2020 car le recensement de la flotte sur le bassin Rhône-Saône utilisé date de 2020. La quasi-totalité des moteurs fonctionne au Diesel en 2020, et la taille de la flotte était relativement stable, l'écart de composition de la flotte entre 2015 et 2020 est très faible, la modification de l'année de référence n'a donc pas d'impact sur les résultats. L'objectif de ce scénario est donc d'étudier l'évolution de la flotte du bassin Rhône-Saône respectant ces contraintes sur les émissions, tout en minimisant le TCO, c'est-à-dire le coût du changement.

Bien que ces objectifs soient appliqués aux émissions à l'échappement, l'analyse du cycle de vie - dont la méthodologie et les résultats pour la flotte du bassin Rhône-Saône sont présentés en section 6 - permettent également d'appliquer les contraintes de réduction des émissions au périmètre du cycle de vie complet, et d'observer les évolutions de la flotte qui en découlent.

La différence entre les périmètres est illustrée en Figure 64.

Dans les deux sous-scénarios, les motorisations d'architecture conventionnelles sont éliminées en 2050. L'hybridation permet de garantir la navigation en « tout-électrique » en zone urbaine, pratique qui sera probablement imposée par la réglementation à cet horizon temporel.

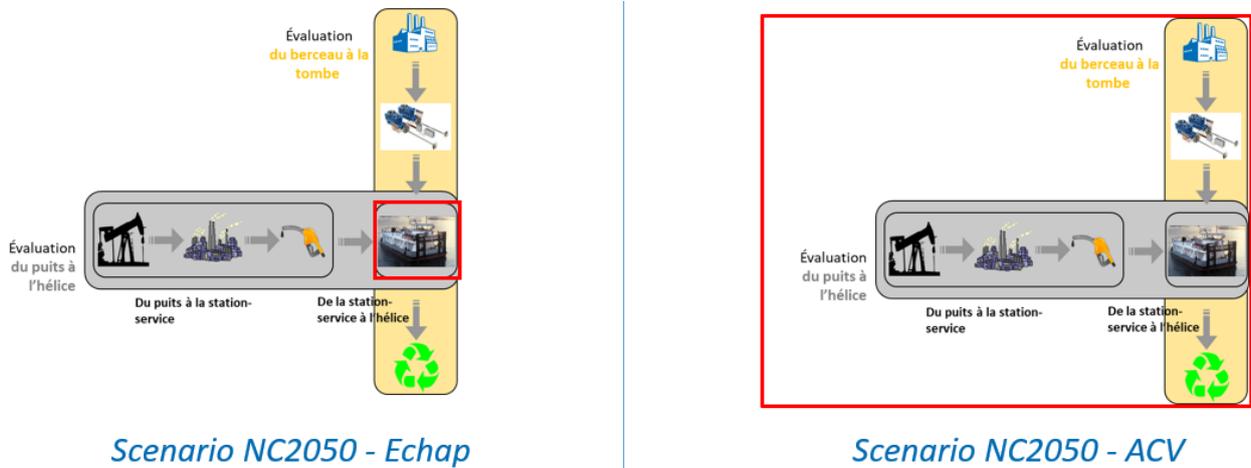


Figure 64 : Périmètre de calcul des émissions dans le scénario NC2050

La Figure 65 présente l'évolution du mix de carburants sur le bassin Rhône-Saône dans le cadre du scénario « Neutralité Carbone 2050 ».

Le graphique de droite présente le scénario où les émissions sont optimisées à l'échappement uniquement. La réduction des émissions de 35% en 2035 qui minimise le TCO est assurée par le passage au biogaz pour les familles Paquebot, Pousseur de ligne et Automoteur, tandis que les autres s'orientent vers le B100. Une petite partie de la flotte passe à l'hydrogène (combustion dans un moteur thermique) en 2035 et un tiers de la flotte de promenade est électrifiée.

En 2050, un petit volume de propulsion biogaz subsiste sur l'ensemble des familles mais l'essentiel de la flotte est converti à l'hydrogène et à l'électrique afin de satisfaire la forte contrainte de réduction de 90% des émissions de GES. L'architecture hybride parallèle avec changement moteur qui est associée à l'hydrogène en 2050 (pour rappel l'architecture conventionnelle est abandonnée en 2050 pour permettre la circulation en tout électrique dans les ZFE), la pile à combustible entraînant une hausse du TCO trop importante par rapport au gain environnemental associé. Les deux familles de bateaux pour lesquelles l'architecture électrique est proposée, le bateau de promenade et le pousseur urbain, sont quasiment entièrement converties au tout électrique en 2050.

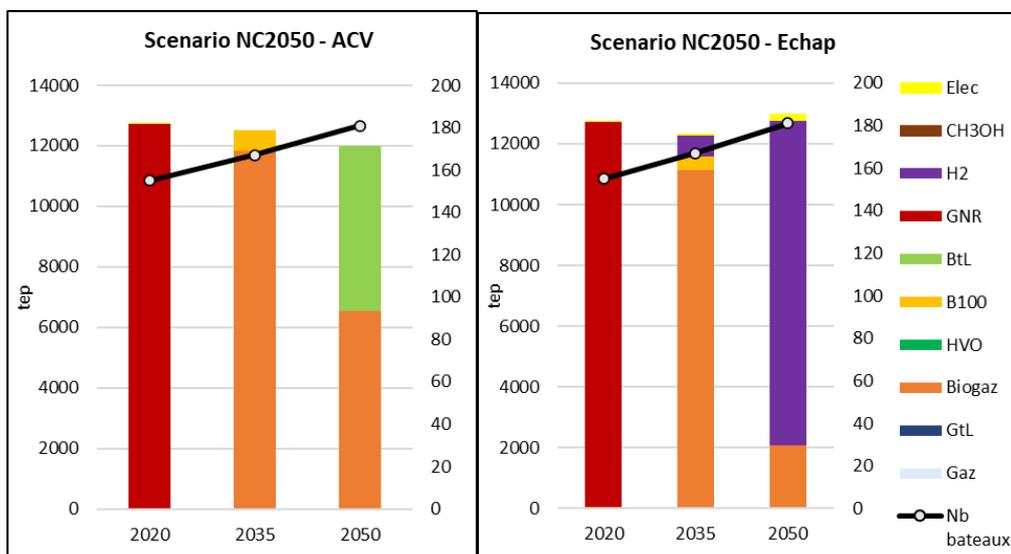


Figure 65 : Consommation d'énergie dans les scénarios Neutralité Carbone 2050

Les résultats sur le périmètre ACV (graphique de gauche) montrent une évolution du mix de carburants différente en 2050. Tandis que les biocarburants étaient peu mis avant dans l'optimisation à l'échappement, leur bilan ACV favorable et leur TCO relativement faible les font émerger dans l'optimisation du périmètre ACV. En 2035 le recours massif au biogaz, complété par du B100, suit la même logique économique que dans le BAU, ce qui suffit à respecter la contrainte de -35% d'émissions de GES en ACV. En 2050, ce sont les configurations au BtL dont le coût de l'énergie a significativement baissé et qui présentent un bilan GES favorable, qui permettent de passer la barre des 90% de réduction des émissions, complétés par du biogaz qui reste le vecteur le plus intéressant du point de vue économique. Malgré une place croissante dans les questionnements autour de la décarbonation du transport maritime et fluvial, le Méthanol n'apparaît pas ici comme une solution pertinente pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de GES. D'autres solutions présentent un meilleur compromis entre performance environnementale et coût économique. En revanche d'autres critères tels la densité volumique d'énergie, et donc l'encombrement à bord, ne sont pas pris en compte et pourraient rendre le Méthanol plus compétitif, face à l'hydrogène en combustion par exemple. Mais les risques de l'utilisation du Méthanol sur l'environnement en milieu confiné et la santé humaine sont aussi à prendre en compte.

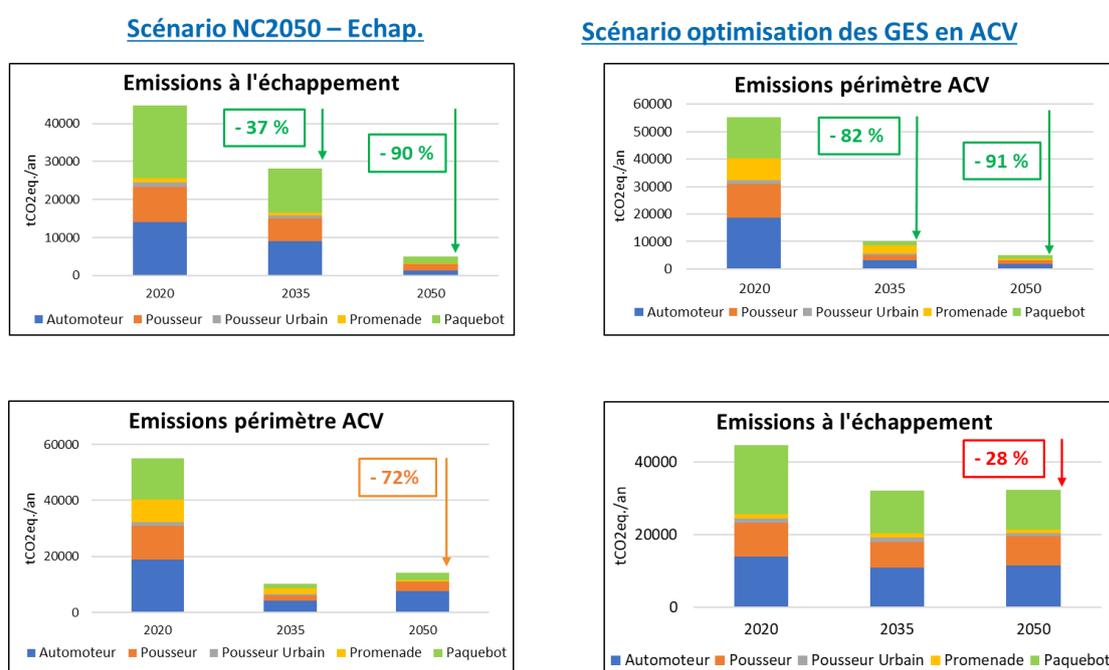


Figure 66 : Evolution des émissions de GES dans le scénario NC2050

Que la flotte soit optimisée sur le périmètre ACV ou échappement, le résultat peut être quantifié en termes d'émissions de GES sur les deux périmètres. Les résultats de cette quantification sont visibles en Figure 66. On voit que le résultat du scénario optimisé à l'échappement (barres vertes) atteint les -37% puis -90% d'émissions sur le périmètre à l'échappement, mais également que les émissions en ACV diminuent fortement (-80% en 2035 et -72% en 2050). En revanche les résultats du scénario optimisé en ACV (barres jaunes) fournissent des résultats satisfaisants sur les émissions en ACV (-80% en 2035 et -90% en 2050) mais les émissions à l'échappement baissent peu (-27% en 2035 et -28% en 2050), ce qui s'explique par les bilans très différents des biocarburants et du biogaz sur les deux périmètres d'émissions.

La performance économique est très différente selon le périmètre d'optimisation des émissions considéré, comme le montre la Figure 67. Dans le scénario optimisé à l'échappement, le passage par le biogaz en 2035 permet une réduction significative du TCO (-40%). En revanche en 2050 le recours à l'hydrogène, vecteur au TCO élevé, entraîne une baisse de seulement 8% du TCO par rapport à 2020, due uniquement à l'électrification de la consommation à quai. En effet la partie du TCO liée à la navigation (violet) augmente le TCO d'environ 10%, compensé par le gain à quai (partie grise).

Sur le scénario optimisé en ACV, le recours massif au biogaz, accompagné par le BtL en 2050, entraîne une réduction du TCO sur les deux horizons temporels, avec une légère hausse entre 2035 et 2050 due au passage d'une partie de la flotte du biogaz au BtL, vecteur plus onéreux. Cette analyse sera remise à jour dans les suites ultérieures de l'étude en prenant en compte l'effet encombrement du gaz qui ne répond pas aux besoins en termes de chargement de l'ensemble des applications fluviales.

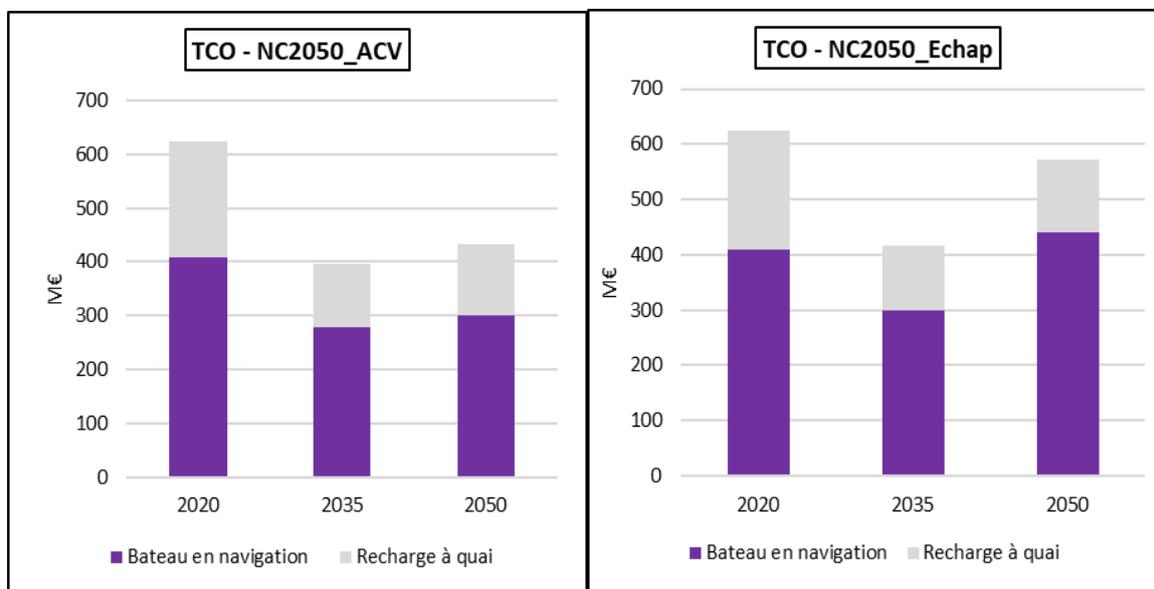


Figure 67 : Evolution du TCO dans le scénario NC2050

7.3.3 H2PUSH

L'objectif de ce scénario est d'observer les conditions économiques permettant la pénétration de solutions basées sur le vecteur hydrogène renouvelable (produit par électrolyse à partir d'énergies renouvelables). Seule la contrainte de 35% de réduction des émissions de CO2 est imposée en 2035, en raison du fait que les actions de décarbonation en vue de cet objectif, et les financements associés, sont déjà à l'œuvre.

Deux jeux d'hypothèses sont mis en place, plus optimistes que le « Business As Usual » quant à la baisse du prix de l'hydrogène et du coût des technologies associées. Ils reflètent une volonté forte des pouvoirs publics de développer l'hydrogène, qui peut se traduire par des aides au développement industriel pour des Gigafactories de piles à combustible qui feraient baisser leur coût marginal, ou des exemptions de taxes, voire des mécanismes d'aides pour faire baisser le prix de l'hydrogène à « la pompe ». Ce genre d'hypothèses est encouragé par les récentes annonces gouvernementales en France, notamment le « plan de relance » et le « plan France 2030 ».

Ainsi deux sous-scénarios de prix des éléments associés à l'hydrogène sont réalisés (Figure 68), afin d'identifier le palier au-delà duquel l'hydrogène devient un choix économiquement favorable, au moins en 2050.

Année	Prix de l'H2 (€/kg)			Coût PAC (€/kW)			Coût moteur ICE H2 (€/kW)		
	2020	2035	2050	2020	2035	2050	2020	2035	2050
BAU	10	6	4	2500	2200	2000	618	600	570
H2PUSH_1	10	5	2	2500	2000	1700	618	580	550
H2PUSH_2	10	4	1,5	2500	1800	1500	618	580	550

Figure 68 : Hypothèses de prix de l'H2 et de coût de la PAC dans les scénarios H2PUSH

Les hypothèses du scénario « H2PUSH_1 » ne sont pas assez favorables pour observer une pénétration de l'hydrogène en 2035 ou 2050. En 2035 les résultats sont les mêmes que dans le « NC2050_Echap » en raison de la contrainte sur les émissions à l'échappement, et en 2050 les résultats sont ceux du BAU.

La Figure 69 présente le mix carburant avec le jeu d'hypothèses « H2PUSH_2 ». On voit qu'en 2035 les résultats sont les mêmes que dans le « NC2050_TTW », l'hydrogène n'est toujours pas assez favorable pour suppléer le biogaz. En revanche en 2050, la part d'hydrogène croît, devenu le choix économiquement préférable pour les familles « pousseur urbain » et « promenade ». Le biogaz reste majoritaire en terme de consommation totale de carburant. L'évolution des émissions de GES et du TCO est visible en Annexe 7.5

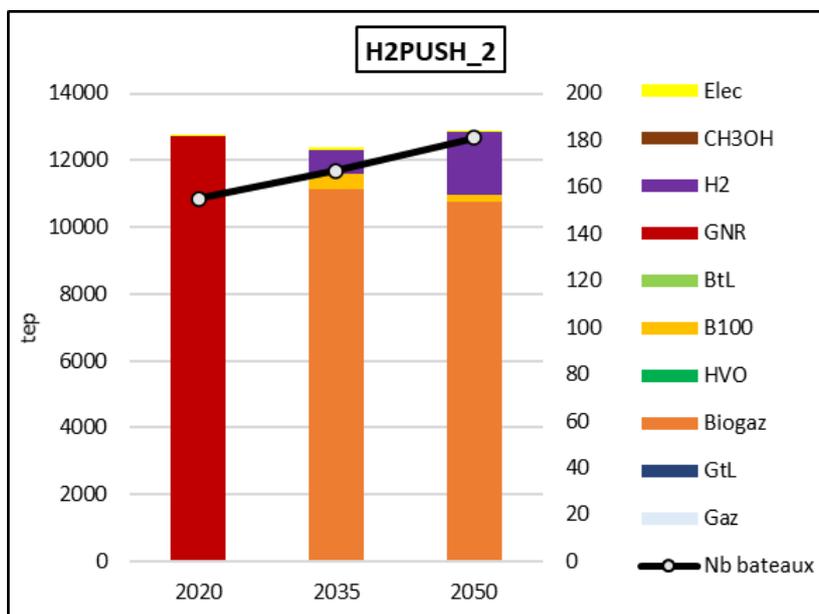


Figure 69 : Consommation d'énergie dans les scénarios H2PUSH

7.4 Conclusion

Le Tableau 29 synthétise les performances principales des différents scénarios :

Tableau 29 : Synthèse des performances par scénario

	BAU	NC2050 – Echap	NC2050 – ACV	H2PUSH_2
Carburants ppaux 2035	Biogaz, B100	Biogaz, B100, H2	Biogaz, B100	Biogaz, H2
Carburants ppaux 2050	Biogaz, BtL	H2, Biogaz, Elec	Biogaz, BtL	Biogaz, H2
ΔTCO (2020 – 2050)	-37%	-33%	-37%	-35%
ΔTCO (2020 – 2035)	-37%	-8%	-31%	-35%
ΔGES – Echap (2020 – 2035)	-28%	-37%	-28%	-37%
ΔGES – Echap (2020 – 2050)	-31%	-90%	-28%	-40%
ΔGES – ACV (2020 – 2035)	-82%	-82%	-82%	-83%
ΔGES – ACV (2020 – 2050)	-87%	-79%	-91%	-85%

Le travail prospectif réalisé en dernière phase de l'étude permet de **combiner les trois types d'analyses menées dans l'étude (énergétique, économique et environnementale)** afin d'optimiser l'évolution de la composition de la flotte du bassin Rhône-Saône aux horizons temporels 2035 et 2050. L'indicateur TCO est indispensable à l'optimisation de la flotte aux différents horizons temporels, puisque tous les scénarios minimisent le TCO, en fonction de différentes contraintes qui leur sont propres. Cependant une large partie de la réduction observée est due à l'électrification de la consommation à quai, et non aux choix de filières alternatives pour les différentes familles de bateaux. Ainsi la valeur de réduction du TCO n'est pas considérée dans le choix de la trajectoire de transition optimale de la flotte, l'attention étant portée sur l'évolution des émissions de GES.

Les scénarios « **Neutralité Carbone** » garantissent une réduction des émissions de 35% en 2035 et de 90% en 2050, ils permettent donc de procéder à la décarbonation du bassin Rhône-Saône.

Au vu des résultats sur ces scénarios, le **biogaz ressort comme le carburant permettant d'atteindre les objectifs de décarbonation à l'horizon 2035**, tant sur le périmètre ACV que sur le périmètre des émissions à l'échappement. En revanche à l'horizon 2050, deux trajectoires peuvent se dessiner.

Le **scénario « NC2050-ACV » préconise un mix composé quasiment à 50-50 de Biogaz et de BtL**, ce qui garantit le respect de la contrainte de réduction des émissions sur le périmètre ACV. En revanche sur le périmètre à l'échappement, la diminution n'atteint pas les 50%, ce qui présage des émissions de polluants locaux issus de la combustion de carburants carbonés.

Quant au **scénario « NC2050 – Echap », il préconise le recours massif à l'hydrogène en 2050**, ce qui garantit le respect de la réduction des émissions de CO₂ de 90% à l'échappement, mais aussi une baisse significative des émissions en ACV (-80%). Or c'est bien le périmètre ACV qui par une prise en compte d'un plus grand nombre d'éléments associés à un service rendu, quantifie de la façon la plus précise l'ensemble des émissions de GES. C'est donc le respect des contraintes de réduction des émissions de GES en ACV qui traduit la trajectoire la plus ambitieuse de décarbonation.

Ainsi, une trajectoire de transition qui passerait par le recours massif au biogaz à l'horizon 2035, remplacé ensuite par l'hydrogène à l'horizon 2050, serait la trajectoire recommandée pour un verdissement de la flotte. Mais cet exercice prospectif comprend des limites propres (qui s'ajoutent aux limites des phases d'évaluation énergétique, économique et environnementale) qu'il est essentiel de rappeler, afin d'analyser plus finement ces résultats dans le futur.

D'une part, la réduction de l'impact environnemental de la flotte ne se concentre que sur les émissions de GES. Or, les analyses énergétiques et du cycle de vie permettent de quantifier d'autres indicateurs comme les polluants locaux ou l'impact sur la santé humaine, qu'il est important de prendre également en compte dans la détermination d'une trajectoire de transition écologique.

De plus, certains critères pouvant être limitant dans le contexte du transport fluvial ne sont pas pris en compte dans l'exercice prospectif, au premier rang desquels l'encombrement et la perte de volume disponible. Le stockage gazeux de biogaz ou d'hydrogène ou encore le poids des batteries pourraient se confronter à ce type de limite en fonction de l'autonomie nécessaire et donc des usages sur le bassin.

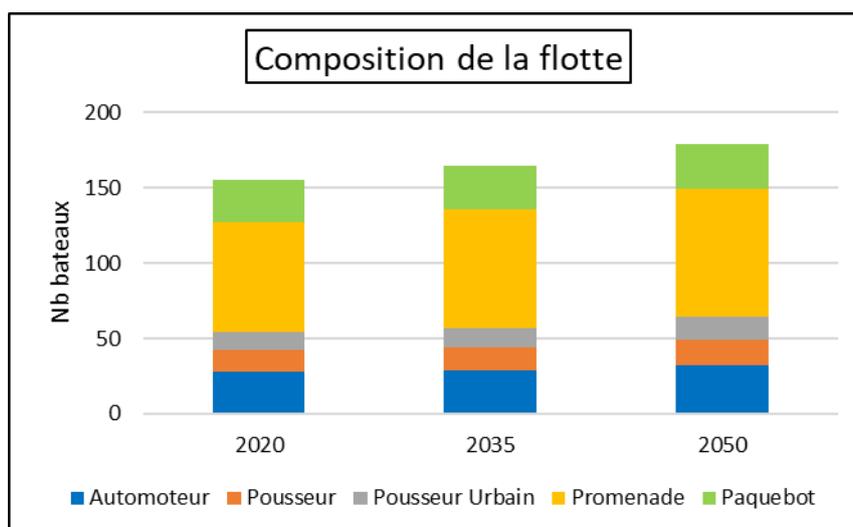
Enfin, le recours aux carburants d'origine biologique (le biogaz et le BtL notamment dans les présentes recommandations) pose **la question de la disponibilité de la ressource** nécessaire à leur utilisation, que ce soit en termes de matière première ou de capacité de transformation, ainsi que l'accès du secteur fluvial à cette ressource dans un contexte tendu sur la demande. La PPE [55] prévoit une quantité de biogaz disponible d'ici 2028 de 22 à 29 TWh, ce qui est largement supérieur à la demande sur le bassin à l'horizon 2035. En revanche ce biogaz sera réparti entre différents secteurs d'activité (bâtiment, tous transports, etc.) et il sera essentiel de s'assurer qu'un volume suffisant pourra être dédié au secteur fluvial.

De même la disponibilité d'une quantité suffisante d'hydrogène vert à l'horizon 2050 doit être un élément d'attention. La production par électrolyse d'hydrogène renouvelable nécessite d'importantes infrastructures EnR, et donc d'importants investissements. L'hydrogène est, comme le biogaz, convoité par de nombreux secteurs comme le transport et l'industrie, et le secteur fluvial devra s'assurer de bénéficier de volumes suffisants pour répondre à sa demande à l'horizon 2050. Il est également nécessaire de s'assurer des capacités de production des chantiers navals et des constructeurs de solutions de propulsion.

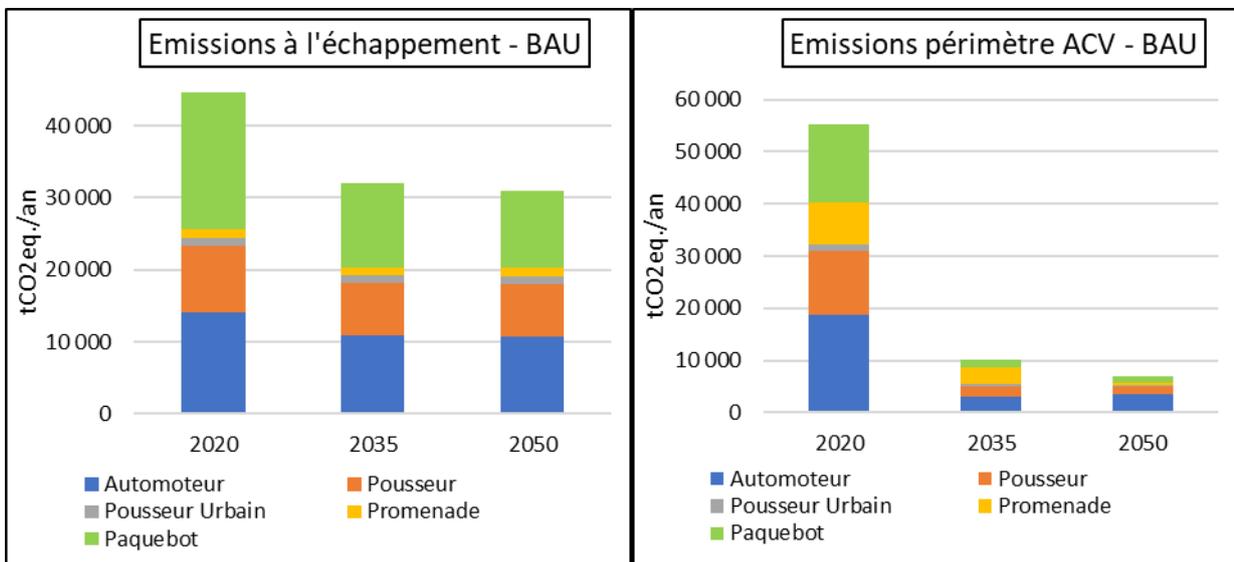
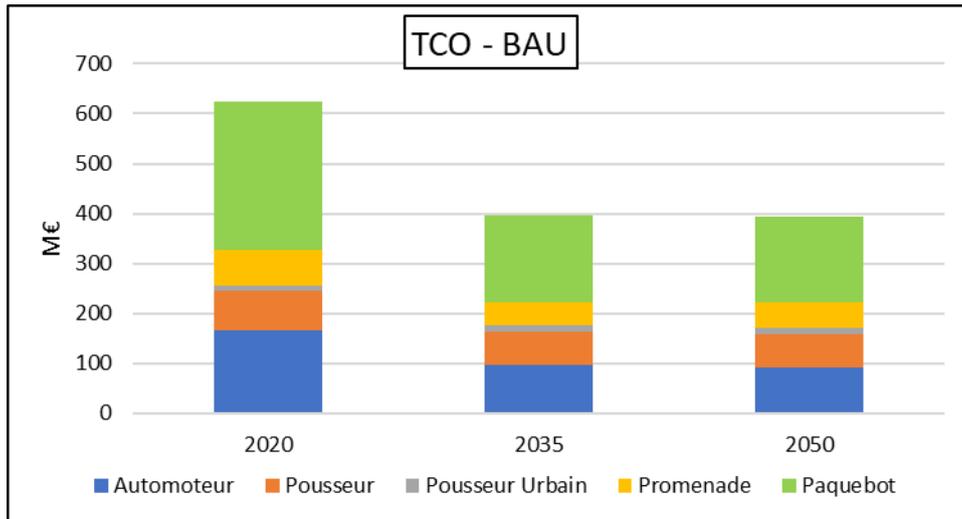
Nous rappelons que le périmètre de la présente étude se limite au bassin Rhône-Saône. Elle a permis de mettre en place les outils et les méthodes pour l'élaboration d'une vision prospective de verdissement du bassin. Les perspectives d'amélioration de cette méthodologie, grâce aux retours des partenaires de l'étude et des acteurs du secteur fluvial, permettent d'envisager une extension de l'analyse multicritère aux autres bassins français, et donc la mise en place d'une feuille de route nationale pour la décarbonation du secteur fluvial.

7.5 Annexes de la phase de projection des résultats

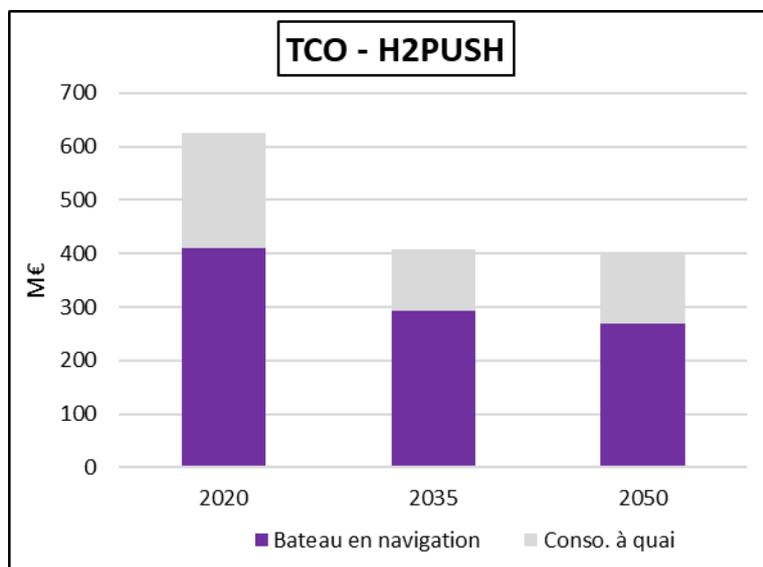
7.5.1 Projection de la flotte sur le bassin Rhône-Saône, par famille de bateaux

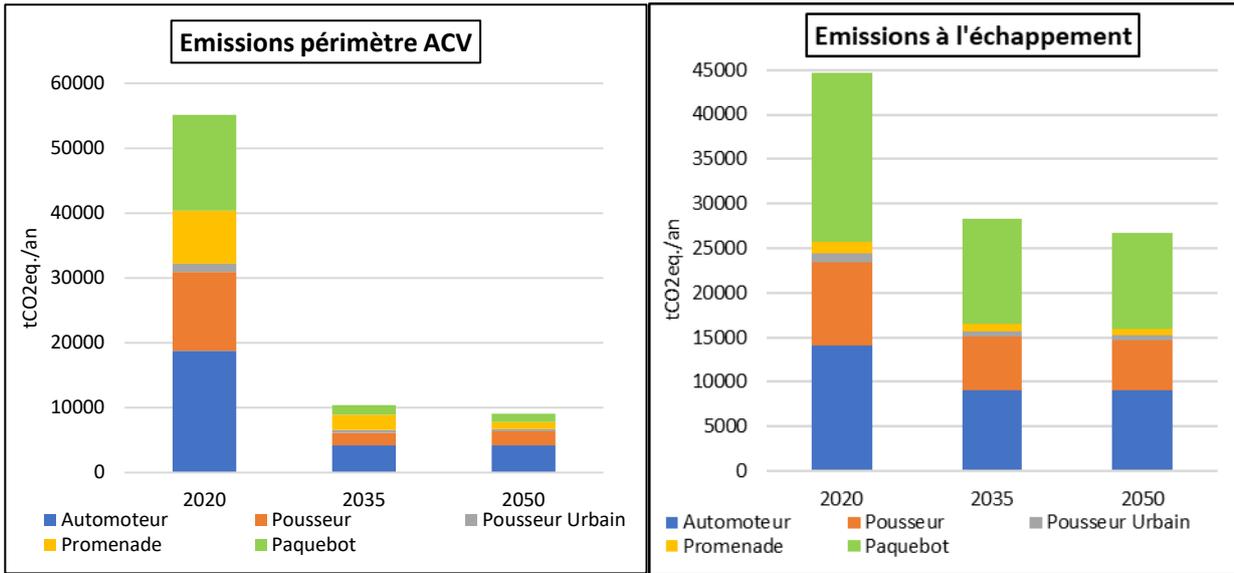


7.5.2 Détail des résultats scénario Business As Usual

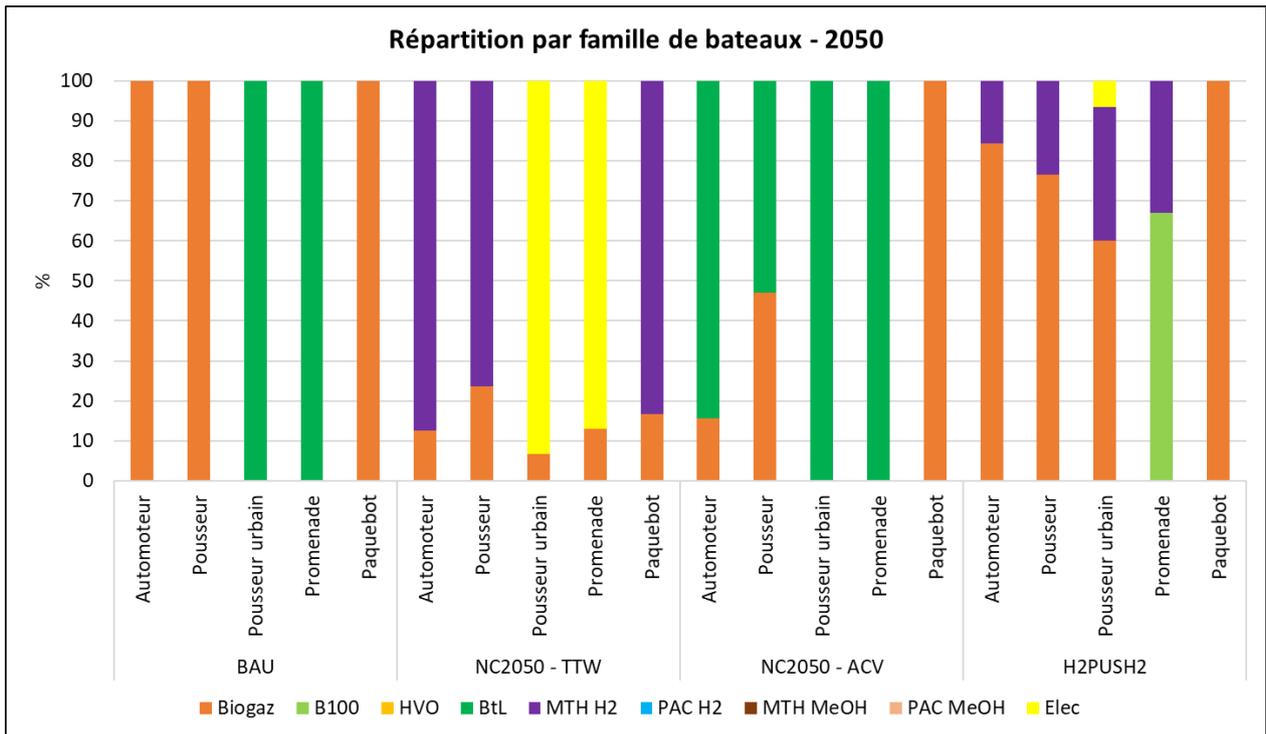


7.5.3 Détails du scénario H2PUSH





7.5.4 Répartition des solutions de propulsion par famille de bateaux pour tous les scenarii



7.5.5 Consommation des vecteurs énergétiques

Business As Usual			H2PUSH_2		
<i>MJ</i>	2035	2050	<i>MJ</i>	2035	2050
GNR	-	-	GNR	-	-
Elec	-	-	Elec	3 134 520	251 280
CH3OH	-	-	CH3OH	-	-
H2	-	-	H2	-	30 551 040
BtL	-	29 811 210	BtL	-	-
B100	29 146 959	-	B100	19 829 043	9 567 881
HVO	-	-	HVO	-	-
Biogaz	494 922 890	499 174 472	Biogaz	465 684 142	450 089 155
GtL	-	-	GtL	-	-
Gaz	-	-	Gaz	-	-

NC2050_TTW			NC2050_ACV		
<i>MJ</i>	2035	2050	<i>MJ</i>	2035	2050
GNR	-	-	GNR	-	-
Elec	3 462 120	9 578 520	Elec	-	-
CH3OH	-	-	CH3OH	-	-
H2	-	29 203 200	H2	-	-
BtL	-	-	BtL	-	228 768 540
B100	19 002 668	-	B100	29 146 959	-
HVO	-	-	HVO	-	-
Biogaz	465 684 142	86 764 773	Biogaz	494 922 890	274 224 236
GtL	-	-	GtL	-	-
Gaz	-	-	Gaz	-	-

8 Références des analyses économiques et prospectives

- CCNR (2018) Déclaration de Mannheim, consulté le 26 avril 2022.
- CCNR (2020) Etude sur le financement de la transition énergétique vers un secteur du transport fluvial européen à zéro émissions, consulté le 26 avril 2022.
- CEA, Roland RIOUX, Sébastien FIETTE (2015) Analyse énergétique et d'usage de bateaux de transport fluvial. CEA.
- Communauté Portuaire de Paris (2020) Synthèse : étude du groupe pilote. La transition écologique de la flotte parisienne, consulté le 26 avril 2022.
- DST (2021) Assessment of technologies in view of zero-emission IWT, consulté le 26 avril 2022.
- ENEA (2017) Overview of the biomethane sector in France, consulté le 26 avril 2022.
- Grzegorz Pawelec (2020) System-based solutions for H2-fuelled water transport in North-West Europe. Comparative report on alternative fuels for ship propulsion. Interreg North-West Europe, consulté le 26 avril 2022.
- IFEPN/ADEME (2022) Transports lourds fonctionnant à l'hydrogène.
- IFPEN/ADEME (2022) Etude Energétique, Economique et Environnementale du Transport routier français à l'horizon 2040.
- IFSTAR / AME / LTE, DEROLLEPOT Romain (2015) Rapport d'étude PROMOVAN.
- Kang, Seungwoo; Boshell, Francisco; Goepfert, Alain; Prakash, Surya G.; Landälv, Ingvar; Saygin, Deger (2021) Innovation outlook. Renewable methanol. Avec la collaboration de Paul Durrant. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency, consulté le 26 avril 2022.
- Marigreen (2018) Perspectives for the use of hydrogen as fuel in inland shipping, consulté le 26 avril 2022.
- Mobilité Hydrogène France (2022) Quelles perspectives pour le poids lourd électrique à hydrogène pour le transport de marchandise, consulté le 26 avril 2022.
- Multronic (2015) PROMINENT_D2.2_Ex-ante-cost-benefit-analysis-of-business-cases-for-standard-after-treatment-configurations.
- PPE (2019) Stratégie française pour l'énergie et le climat. Programmation pluriannuelle de l'énergie, consulté le 26 avril 2022.
- Prominent (2017) D2.6 Ex-ante cost/benefit analysis of business cases for standard LNG configurations, consulté le 26 avril 2022.
- RTE (2021) Futurs énergétiques 2050. L'analyse économique, consulté le 26 avril 2022.
- Stichting Projecten Binnenvaart (2016) PROMINENT_D1 1-List-of-operational-profiles-and-fleet-families.
- Stichting Projecten Binnenvaart (2017) Prominent_D2.6_Ex-ante_cost-benefit_analysis_of_business_cases_for_LNG.
- TNO, R. Verbeek, M. Verbeek (2015) LNG for trucks and ships: fact analysis LNG for trucks and ships: fact analysis Review of pollutant and GHG emissions Final. TNO.

Voir la section 4.5 pour les Références de l'analyse énergétique

Voir la section 6.7 pour les Références de l'analyse environnementale