

HYBA – Hybride Bretagne Atlantique

Porteur : CRPMEM de Bretagne

Responsable : Jacques Doudet

Durée : 18 mois (1er octobre 2023 – 31 Mai 2025)

Montant total du projet : 549 599,86 €

Montant financé par France Filière Pêche : 390 677,53 €



1. Résumé exécutif

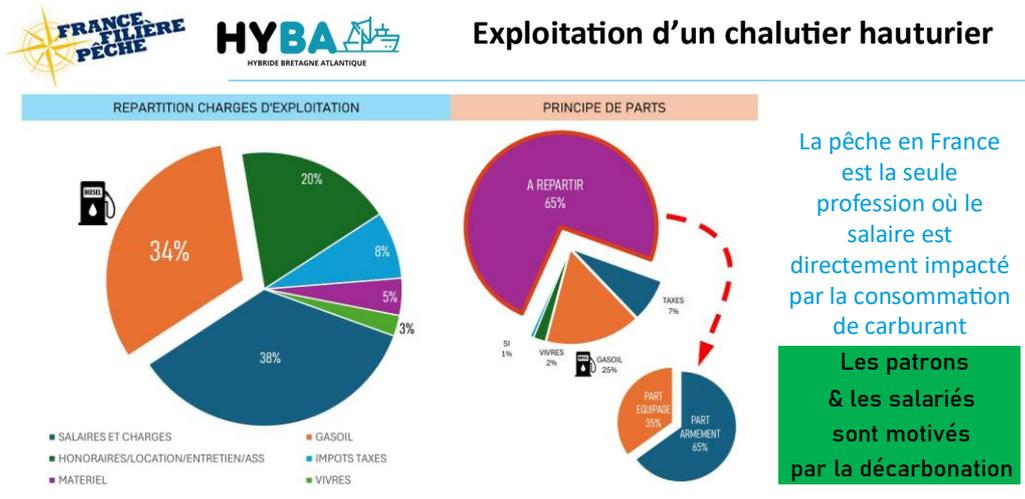
HYBA a été initié en réponse à la crise énergétique affectant les navires de pêche professionnels en Bretagne. Le projet vise à explorer et tester une motorisation hybride parallèle, adaptable à des navires existants. À travers l'instrumentation d'un chalutier de 23 mètres (Naoned), l'analyse de données de consommation réelle et la modélisation d'un jumeau numérique (EcoBoatTwin), HYBA a permis de :

- Identifier les profils de consommation caractéristiques selon les différents types de pêche,
- Évaluer les leviers d'optimisation énergétique à bord (propulsion, chalut, actionneurs),
- Tester des architectures hybrides par simulation,
- Définir un modèle énergétique validé permettant de pré-dimensionner une solution industrielle.

Le projet a démontré que l'hybridation parallèle constitue une solution pragmatique et progressive pour amorcer la décarbonation de la flotte. L'approche holistique de HYBA (énergie, train de pêche, usage réel) représente une méthode reproductible. Le développement de l'EcoBoatTwin permet également d'ouvrir la voie à des applications plus larges, incluant à terme d'autres formes d'énergie (vélique, hydrogène).

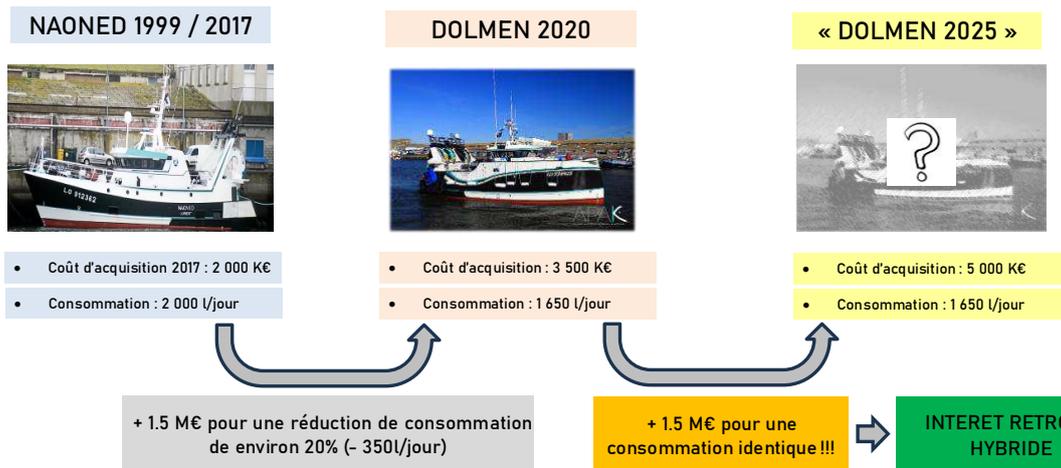
2. Introduction

Depuis 2022, les fluctuations du prix du gazole a fortement dégradé les conditions économiques d'exploitation des navires de pêche. Cette hausse s'inscrit dans un contexte de transition énergétique imposée au niveau européen, avec un impact particulièrement fort pour la Bretagne, qui concentre près d'un tiers de la consommation nationale de gazole pêche.



Dans ce contexte, le projet HYBA a proposé une approche réaliste et immédiatement mobilisable : l'adaptation des technologies hybrides issues de l'industrie automobile au secteur de la pêche. Le rétrofit d'un navire existant permet une modernisation de la flotte envisageable d'un point de vue économique.

Intérêt économique du rétrofit hybride



La phase 1 du projet avait pour objectif de valider la faisabilité technique et économique d'une solution hybride et de construire les bases d'un modèle de simulation permettant d'accompagner la filière vers des choix optimisés.

Table des matières

1. Résumé exécutif	1
2. Introduction	2
3. Présentation du projet	9
4. Gouvernance et partenariats	10
1. Coordination générale	10
2. Suivi administratif et financier	11
3. Organisation des réunions, reporting et communication	11
5. Historique du chalutier	12
6. WP-A - ETAT DES LIEUX ET MESURES	13
1. Objectif	13
2. Travaux réalisés	13
3. Capteurs et interfaces installés	13
4. Interface opérateur	14
5. Données collectées	15
6. Points particuliers et adaptations	15
7. Résultats et apports	15
8. Bancarisation et valorisation des données	15
9. Conclusion	16
7. WP-A – Préparation et réalisation des essais de traction	17
8. WP-B – Optimisation du train de pêche	21
1. Modélisation des engins de pêche	21
2. Chalut pélagique à thons :	23
3. Chalut pélagique à merlus :	25
4. Chalut de fond :	27
9. WP- C – Analyse énergétique	33
1. Implication IMT Atlantique, livrables et workpackages	33
2. Analyse énergétique du navire Naoned dans sa configuration actuelle	34
a. Objectif	34
b. Méthodologie	35
c. Analyse des trois missions-types de pêches	36

1.	Pêche au thon - Juillet 2024	36
2.	Pêche au merlu - Novembre 2024.....	37
3.	Pêche au chalut de fond – janvier 2022	38
4.	Répartition des consommations	38
d.	Analyse détaillée des consommations	39
1.	En navigation.....	39
2.	En pêche.....	40
3.	Conclusion : identification de points de fonctionnement nominaux	41
4.	Consommations des actionneurs hydrauliques ou consommateurs électriques ...	42
5.	Consommations liées au comportement dynamique du navire	47
e.	Conclusions	52
f.	Perspectives	53
10.	WP-C - modélisation énergétique du navire Naoned	54
1.	Modèle énergétique M1 : dans sa configuration 100% diesel actuel	54
a.	Objectif	54
b.	Méthodologie	54
c.	Architecture générale du modèle du navire	54
d.	Modélisation des organes	57
1.	Modélisation de la coque	57
2.	Parametres principaux	59
3.	Modélisation de l'hélice	60
4.	Modélisation du moteur thermique.....	65
5.	Modélisation de la transmission	68
6.	Modèle du chalut.....	68
7.	Modèle du « speed pilot »	69
8.	Modèle de l'Energy Management Controller « EMC ».....	69
9.	Modélisation de l'effet de la houle.....	69
e.	Validation du modèle M1 par confrontation avec les données expérimentales..	70
2.	Définition de scénarios standards	72
3.	Modèle énergétique M2 : dans une configuration hybride parallèle	76
a.	Objectif	76

b.	Méthodologie	76
c.	Architecture générale du modèle du navire	76
d.	Modélisation des organes	77
1.	Modèle du moteur électrique	77
2.	Modèle de la batterie	78
3.	Modèle de la transmission	78
4.	Les 4 modes de gestion énergétique intégrés dans l'EMC.....	79
e.	Algorithme d'optimisation.....	81
f.	Réduction des NOx grâce à l'hybridation parallèle d'un bateau : Transposition positive des résultats automobiles	84
1.	Introduction : Origine, limites et perspectives de l'étude.....	84
2.	Contexte réglementaire et enjeux pour le maritime	84
3.	Principes et modes de l'hybridation parallèle en Automobile.....	84
4.	Mécanismes de réduction des NOx.....	85
5.	Gestion des transitoires et modélisation.....	86
6.	Intégration dans la stratégie d'optimisation énergétique.....	86
7.	Transposition positive au secteur maritime	87
8.	Conclusion	87
4.	Analyse des gains de consommation en carburant en fonction du rétrofit choisi (4 modes) pour le Naoned	88
a.	Objectifs	88
b.	Méthodologie	88
c.	Résultats.....	90
1.	Analyse des résultats en Mode 1	91
2.	Analyse des résultats en Mode 2 et 3	92
3.	Analyse des résultats en Mode 4	92
4.	Gains moyens fonction des activités de pêche	92
5.	Potentiels d'optimisation.....	93
6.	Prise de recul sur ces premiers chiffres.....	93
7.	Gains de consommation avec l'utilisation du chalut optimisé.....	94
5.	Apports méthodologiques innovants du projet HYBA.....	94
6.	Intégration des modèles dans la plateforme EcoBoatTwin.....	95

11.	WP-C – Architecture Navale : Étude de stabilité et d’architecture navale	96
1.	Analyse des impacts de l’hybridation sur la stabilité et l’architecture du navire	96
a.	Détermination du navire léger	96
b.	Détermination des cas de chargement	98
c.	Analyse de la stabilité.....	99
2.	Validation technique des solutions proposées	100
a.	Implantation du réducteur	100
b.	Implantation du moteur électrique	101
c.	Implantation du moteur.....	102
d.	Implantation du local batterie	102
12.	WP-C - Choix du moteur thermique pour l’hybridation – Mitsubishi S6R2	104
13.	WP-C - Réducteur Masson hybridisé	107
1.	Objectifs	107
2.	Démarche et Travaux Réalisés	107
a.	Analyse des besoins et contraintes techniques	107
b.	Recherche et comparaison des solutions de réducteur.....	107
c.	Étude des solutions d’hybridation en prise en compte de l’intégration de la machine électrique	107
d.	Asservissement de l’hydraulique sur la propulsion électrique	111
1.	Solution numéro 1 :	111
2.	Solution numéro 2 :	113
e.	Sélection de la solution optimale	115
3.	Livrables produits	116
4.	Impacts et recommandations	116
14.	WP-C - Choix du Moteur Electrique	117
1.	Rôle du moteur électrique	117
2.	Choix des fournisseurs	117
a.	les moteurs BOSCH REXROTH et leur gamme e-lion	118
1.	Solution 50 kW	118
2.	Solution 100 kW	118
b.	les moteurs DANA.....	119

1.	Solution 50 kW (LD HV800).....	119
2.	Solution 100 kW (HP HV1000).....	119
3.	Configuration retenue	119
4.	Onduleur et tension d'alimentation	120
15.	WP-C - Choix des Batteries	121
1.	Enjeux de l'hybridation et critères de sélection.....	121
2.	Fournisseurs considérés : Lehmann Marine vs PowerTech Systems	122
a.	Lehmann Marine	122
b.	PowerTech Systems.....	123
c.	Comparaison et choix final	124
3.	Résultats techniques et bénéfices attendus.....	125
16.	Adaptation de l'hélice au nouveau système hybride parallèle.....	126
1.	Hélice actuelle	126
2.	Optimisation de la ligne propulsive.....	127
17.	Évaluation technico-économique des solutions.....	128
1.	Chiffrage du projet de R&D pour le développement du Démonstrateur industriel HYBA Phase 2 sur le NAONED:.....	128
2.	Retour sur Investissement « Série HYBA » pour les armateurs, à la suite du démonstrateur industriel NAONED.....	129
a.	Retrofit sur navire existant:	129
b.	HYBA sur navire neuf	130
3.	ROI du chalut optimisé :	130
4.	Des ROI « pessimistes »:	131
18.	Communication, Valorisation et Transfert.....	133
1.	Rédaction des livrables et synthèses	133
2.	Organisation de la restitution auprès des parties prenantes	133
3.	Revue de presse et visibilité publique	133
4.	Présentations et évènements majeurs du projet HYBA (2023–2025).....	134
5.	Conclusion.....	134
19.	EcoBoatTwin: Démonstrateur numérique pour la transition énergétique des navires de pêche – Livrable additionnel	135
1.	Objectif.....	135

2.	Travaux réalisés	135
3.	Résultats obtenus	135
4.	Perspectives	136
5.	Intérêt pour la filière	136
6.	Conclusion.....	136
20.	Conclusion Technique et scientifique	137
1.	Conclusion sur l’architecture hybride parallèle et recommandations d’optimisation	137
2.	Réduction des émissions de NO _x : un enjeu complémentaire à l’économie de carburant	138
3.	Conclusion – Chalut optimisé et réduction de la traction	138
4.	Complément à la conclusion générale – Perspectives technologiques	139
21.	Conclusion globale du projet HYBA – Vision stratégique et perspectives élargies....	140
22.	Pourquoi faire le démonstrateur industriel HYBA Phase 2 ?.....	144
1.	Répondre à une urgence économique et énergétique	144
2.	Apporter une solution pragmatique, reproductible et immédiatement mobilisable 144	
3.	Valider la performance en conditions réelles et industrialiser la solution	144
4.	Structurer une filière innovante et souveraine	145
5.	Répondre aux attentes des financeurs, des institutionnels et des professionnels 145	
6.	En résumé	145
23.	Annexes	145
	Annexe : Plan d’expérience et catalogue des scénarios de tests de base pour la journée de test de l’instrumentation du Naoned, le 17 juillet 2024.	146

3. Présentation du projet

HYBA est un projet structurant organisé autour de deux grands axes :

- L'optimisation énergétique par instrumentation, analyse de données, modélisation numérique et pré-dimensionnement de solutions d'hybridation.
- L'optimisation du train de pêche et la réduction des besoins de traction, en lien avec l'architecture propulsive.

La phase 1 comprenait les étapes suivantes :

- Instrumentation embarquée (Marinelec)
- Acquisition de données en mer (APAK)
- Modélisation énergétique (IMT Atlantique, Vectura)
- Études techniques navales (COPREXMA, PIRIOU)
- Optimisation du chalut (Le Drezen)
- Pré-dimensionnement des systèmes hybrides (Vectura, Masson)
- Analyse des impacts sur la jauge et la stabilité

À l'issue de la phase 1, un Go/No-Go est prévu pour la phase 2, consistant à intégrer le système hybride sur le Naoned et à valider les performances sur un cas réel.



4. Gouvernance et partenariats

Le projet a été porté par le CRPMEM de Bretagne, avec un consortium de 11 partenaires:

Partenaire	Rôle principal
CRPMEM Bretagne	Porteur – coordination, bancarisation des données
APAK / SCAPAK	Armateur, mise à disposition du navire Naoned
Vectura System	Modélisation énergétique, jumeau numérique et dimensionnement de l’hybridation
Le Drezen	Optimisation du train de pêche (chalut de fond)
Piriou Naval Services	Évaluation des travaux, chiffrage
Coprexma	Architecture navale, jauge et stabilité
Masson	Étude du réducteur et ligne propulsive hybride
Marinelec	Instrumentation embarquée et collecte de données
IMT Atlantique	Analyse énergétique, modèle numérique
École Navale	Expertise propulsion, modélisation IA

Pour plus d’information, veuillez contacter :

- Sébastien BERTHEBAUD- Société Vectura System- responsable scientifique du projet : 06.65.36.85.21
- Jacques DOUDET- Secrétaire Général du CRPMEM de Bretagne : 06.83.18.91.28

1. Coordination générale

La coordination du projet HYBA s’est structurée autour d’un trinôme complémentaire :

- Le CRPMEM de Bretagne a assuré la coordination administrative, institutionnelle et financière du projet, en tant que porteur officiel.
- Vectura System a piloté la coordination technique et scientifique, notamment sur les volets de modélisation, d’ingénierie énergétique et de développement numérique (EcoBoatTwin).
- APAK a assuré la coordination des interventions et essais sur le navire ainsi l’échange constant avec les marins-pêcheurs

Ce trinôme a permis de garantir une gouvernance équilibrée entre maîtrise du cadre réglementaire, expertise métier halieutique et innovation technologique. Chaque partenaire a été impliqué à hauteur de son expertise dans un esprit de complémentarité et de co-construction.

2. Suivi administratif et financier

Le CRPMEM a assuré la centralisation des éléments administratifs (conventions, justificatifs, attestations partenaires), ainsi que le suivi budgétaire du projet. Une maquette de suivi a été partagée à l'ensemble des partenaires pour assurer la transparence dans l'utilisation des financements. Les dépenses ont été tracées en lien avec les trames de reporting intermédiaire et final fournies par France Filière Pêche. Une revue financière semestrielle a permis d'assurer la cohérence et l'éligibilité des postes de dépenses tout au long de la durée du projet.

3. Organisation des réunions, reporting et communication

Une dynamique collaborative forte a structuré le pilotage opérationnel du projet HYBA. Des réunions de COPIL ont été organisées tous les mois, en complément des formats techniques (ingénierie, instrumentation) et stratégiques (évaluation des résultats, valorisation, perspectives).

La coordination de la communication, de la valorisation et des relations presse a été menée conjointement par le CRPMEM, Vectura System et l'armement APAK. Cette répartition tripartite a permis d'assurer une diffusion fluide des informations vers les acteurs de la filière, les institutionnels et les médias. Le rapport consolidé a été produit par Vectura avec validation collégiale des livrables à chaque jalon projet.

5. Historique du chalutier

Le NAONED est un chalutier Français de 23.6 mètres construit par les chantiers PIRIOU en 1999. Ce chalutier a été équipé à sa construction par MASSON MARINE pour le réducteur (modèle ESD 800) et par RENOU DARDEL pour l'hélice à pas variable (HPV 804). Dans cette optique MASSON MARINE (ayant récupéré le département propulsion de RENOU DARDEL) a été contacté pour participer au projet Hybride Bretagne Atlantique (HYBA).

Dans le but d'optimiser du mieux possible la ligne de propulsion afin de pouvoir réduire au maximum la consommation en carburant du chalutier, il a fallu statuer sur l'équipement et l'encombrement actuel du bateau.

La ligne de propulsion actuelle est composée de la façon suivante :

- Un moteur ABC de 900cv à 750 rpm.
- Un réducteur MASSON MARINE ESD 800 ratio 2.953.
- Une HPV 804 RENOU DARDEL \varnothing 2070 mm sous tuyère \varnothing 2100 mm pour une vitesse hélice de 254 rpm.

		TYPE : HPV	NOM DU BATEAU : NAONED	
		804 G	ex: CANTISAR II	
CLIENT :	ABC		COMMANDE :	16313
ARMATEUR :	FREUILLET APAK.		DU :	20.1.53
CHANTIER :	PIRIOU.		DEVIS :	Tuyère : 140103
MECANICIEN :			LIVRAISON :	11.6.33
ETUDE :				
TYPE DE BATEAU :	chalutier Aeres.			
SERRAGE :	MM	BRIDE AR LONG. :	MM	COTE B : MM
N° D'HELICE :	35247	DIAMETRE :	2070	POUR TUYERE \varnothing : 2100.
SENS :	G	PAS NOMINAL :	2070	MODELE DE PALE : 2492
MOTEUR MARQUE ET TYPE :	ABC.			
PUISSANCE :	850 CV	REGIME :	750 TR/MN	P/N : 334
	Possible 900			354
REDUCTEUR MARQUE ET TYPE :	SEE ESD 800			
N° :	24215	REDUCTION :	1/2,953	REGIME HELICE : 254 TR/MN
POMPE ATTELEE TYPE :				
	N° :			

Du côté de l'encombrement du bateau et des impositions liés à cela, nous ne pouvons pas modifier ou changer la tuyère et par définition le \varnothing maximal de l'hélice ne pourra pas être supérieur à 2070 mm. De plus, les performances maximum de l'hélice ne pourront pas être modifiées et resteront limitées à **3.3 kW/rpm**.

6. WP-A - ETAT DES LIEUX ET MESURES

1. Objectif

Mettre en place un système d'instrumentation complet à bord du chalutier Naoned pour permettre l'acquisition, l'enregistrement et la transmission des données nécessaires à l'analyse énergétique et environnementale du projet HYBA.

2. Travaux réalisés

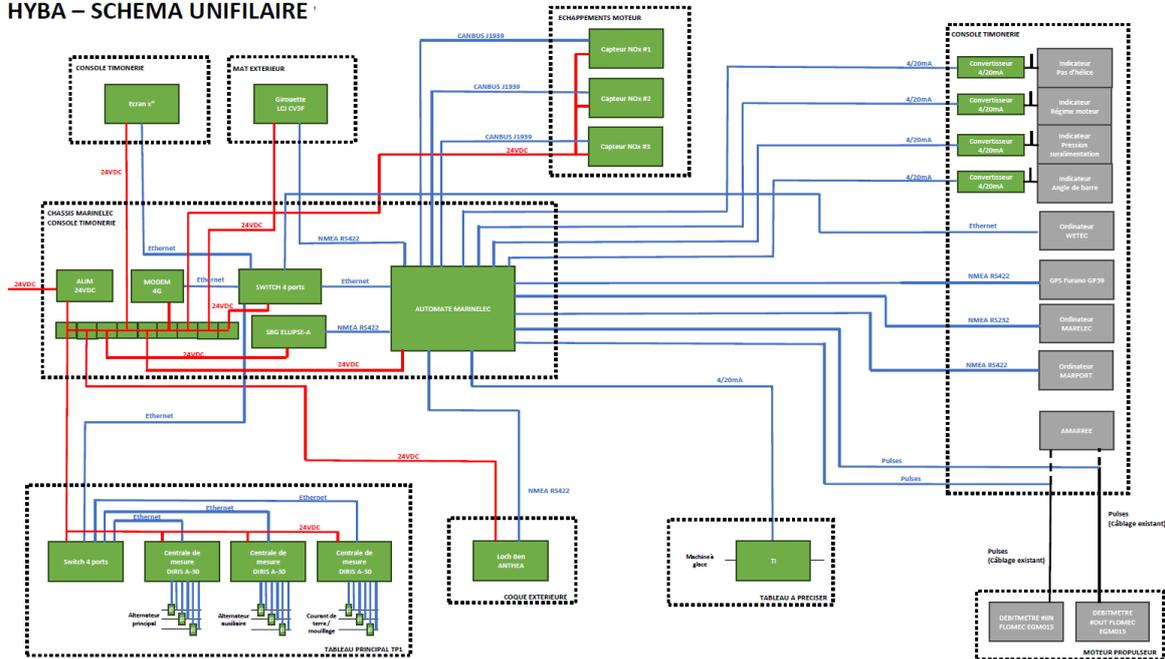
- Installation du système ECOMER
- Période d'installation : 8 au 17 juillet 2024
- **Système central** : Châssis Marinelec installé dans la console de timonerie, intégrant l'automate de gestion des signaux, l'interface opérateur et les modules de communication à terre.

3. Capteurs et interfaces installés

- **Capteurs principaux** :
 - Anémomètre à ultrasons (CV3Fm6) pour vitesse/direction du vent
 - Loch BEN Marine Anthea pour la vitesse et la distance parcourue
 - Centrale inertielle (SBG Ellipse-A) pour mesurer les accélérations et attitudes du navire
 - Capteur linéaire Positek P118 pour le régulateur de vitesse mécanique du moteur principal
 - Trois centrales de mesure pour les puissances des alternateurs (principal, tribord, bâbord)
 - Trois capteurs NOx BOSCH pour les émissions du moteur principal
 - Transformateur d'intensité pour la consommation de la machine à glace
- **Indicateurs récupérés** :
 - Pas d'hélice, angle de barre, régime moteur, pression suralimentation
- **Interfaces avec systèmes existants** :
 - Système MARPORT (capteurs sur le chalut) via NMEA0183 RS232
 - Système MARELEC (treuils de senne) via ASCII RS485
 - Système WETEC (treuils de pêche) via MODBUS TCP
 - GPS Furuno GP39 via buffer dédié

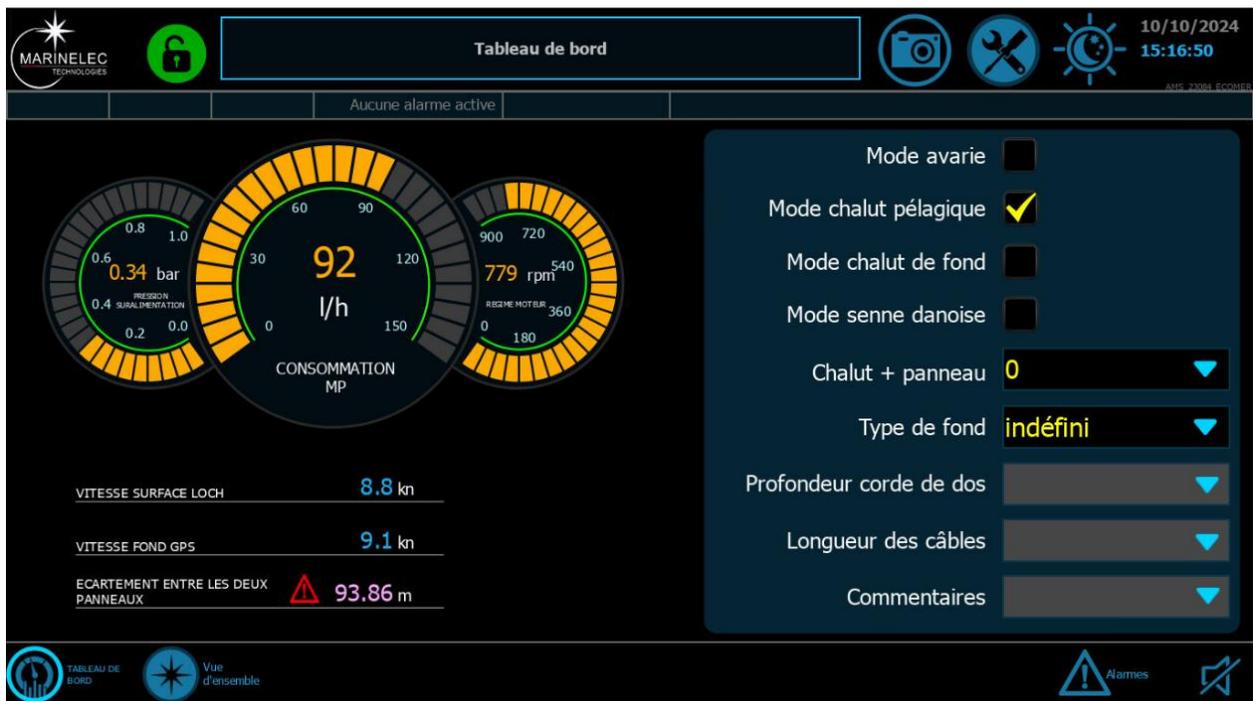
- Débitmètres FLOMEC EGM015 (aller/retour) connectés directement au châssis Marinelec

HYBA – SCHEMA UNIFILAIRE



4. Interface opérateur

- Écran tactile 15 pouces dans la console de timonerie
- Visualisation en temps réel de tous les capteurs
- Saisie manuelle des informations contextuelles par l'équipage
- Gestion de la transmission des données à terre



5. Données collectées

- **Liste exhaustive des signaux analogiques et numériques** : 80 paramètres, couvrant la propulsion, la consommation, la pêche, les conditions environnementales, les émissions, etc.
- **Enregistrement à haute fréquence** :
 - 10 Hz pour les signaux dynamiques (pulses, accélérations, etc.)
 - 1 Hz pour les paramètres principaux (consommations, puissances, émissions, etc.)
- **Format des fichiers** : CSV, structurés pour une exploitation simple en post-traitement
- **Transmission** : Accès sécurisé aux enregistrements via navigateur cloud compatible Amazon S3, identifiants fournis aux partenaires

6. Points particuliers et adaptations

- **Calibration** : Loch et débitmètres calibrés pour garantir la fiabilité des mesures.
- **Alimentation spécifique** : Installation d'une alimentation dédiée pour les capteurs NOx, indépendante des autres circuits du bord.

7. Résultats et apports

- **Système d'instrumentation opérationnel** et robuste, couvrant l'ensemble des besoins du projet HYBA.
- **Collecte de données multi-sources** permettant une analyse énergétique fine et une évaluation précise de l'impact environnemental.
- **Intégration réussie** avec les systèmes existants du navire sans perturber l'exploitation courante.
- **Interface conviviale** pour l'équipage, facilitant la saisie et le suivi des données.
- **Base de données structurée** pour les futurs travaux d'analyse et d'optimisation.

8. Bancarisation et valorisation des données

Environ 5 Go de données contenues dans presque 10000 fichiers ont été enregistrées avec le système ECOMER pendant les campagnes de mesures.

Ces données ont été anonymisées et elles sont mises à disposition de l'ensemble de la filière sur demande au CRPMEM de Bretagne (<https://www.bretagne-peches.org/>)

9. Conclusion

Le WP-A a permis d'équiper le Naoned d'un dispositif d'instrumentation avancé, garantissant la qualité et la fiabilité des données collectées. Ce socle technique est essentiel pour les phases d'analyse énergétique, de modélisation et d'optimisation prévues dans le projet HYBA, et constitue un modèle reproductible pour d'autres unités de la flotte.

Le navire était d'un grand nombre de capteurs. On peut se poser la question de quels capteurs il serait intéressant de garder pour une exploitation améliorée d'une flotte de navires, afin de pouvoir monitorer au plus juste les performances énergétiques des bateaux, et prendre des décisions permettant d'optimiser énergétiquement et financièrement la flotte.

Hormis les équipements standards déjà disponibles sur tous les navires comme le GPS, nous pouvons conclure que les mesures les plus utiles pour faire nos analyses ont été :

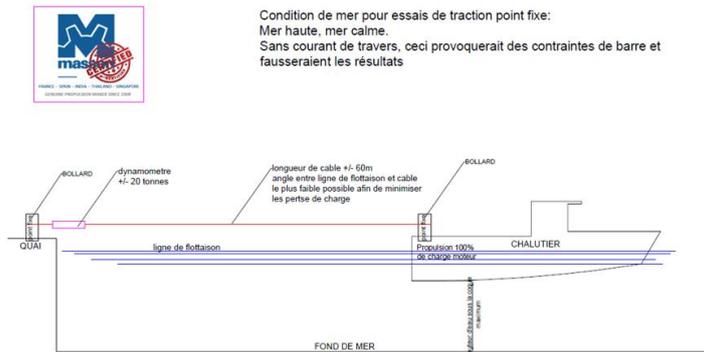
- La vitesse surface du navire (loch) : selon l'axe longitudinale du navire seulement,
- Les débitmètres,
- La centrale inertielle (partie gyroscopique notamment) : mesures fondamentales peut-être devant nous permettre d'estimer un état de mer,
- Régime moteur,
- Pas d'hélice,
- Consommateurs hydrauliques : même si une mesure complète (au niveau du distributeur ?) aurait été nécessaire.

L'instrumentation sur le réseau de bord électrique a finalement été peu exploitée, car après une première estimation, la faiblesse des puissances en jeu nous ont amené à négliger ces consommations.

7. WP-A – Préparation et réalisation des essais de traction

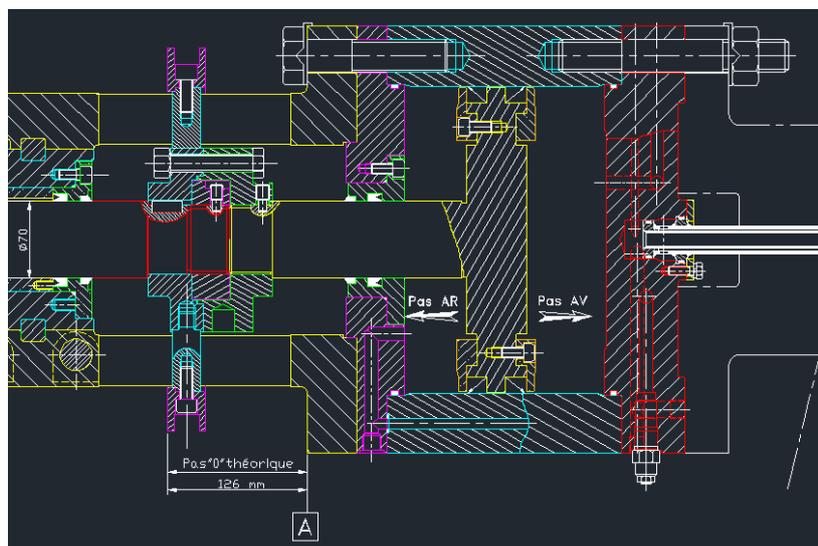
Dans le but de valider les performances théoriques annoncées de la ligne de propulsion, MASSON MARINE a proposée de réaliser des essais de traction au point fixe avec la ligne de propulsion d'origine. L'objectif de ce test est de donner pour chaque position du tiller (avec le Pas hélice associé), une valeur de traction en daN.

Dans cette optique, MASSON MARINE a rédigé un processus de test :



Dans un second temps, il est impératif de connaître la corrélation entre la position du tiller et le pas d'hélice. Afin de pouvoir mettre en pratique cette corrélation, l'équipe MASSON MARINE est allée sur place dans le but de faire des relevés d'avance du vérin de l'hélice à pas variable. En effet, la modification du pas de l'hélice est faite par le biais d'un vérin hydraulique. Le déplacement du vérin est indiqué par le « répéteur de pas », cet élément est composé de 2 parties, le collier de répéteur de pas fixé au vérin de l'HPV et le répéteur de pas lui-même.

Afin de connaître la valeur de déplacement du vérin, il suffit de mesurer la cote entre le collier du répéteur et la face arrière du corps du vérin (repère A)



Lors de la prise de valeur ayant eu lieu le 17 Juin 2024 à bord du NAONED, l'équipe MASSON MARINE a prit pour chaque indication du tiller, la course du vérin associé.

Indication Tiller	Côte relevée (mm)	Course du vérin (mm)
0	131,34	0
5	123,2	8,14
8	120,58	10,76
11	119,4	11,94
15	116,41	14,93
18	114,64	16,7
21	112,7	18,64
23	110,77	20,57
26	108,88	22,46
29	107,41	23,93
32	105,29	26,05
35	103,36	27,98
38	101,51	29,83
41	99,98	31,36
45	97,4	33,94
49	94,88	36,46

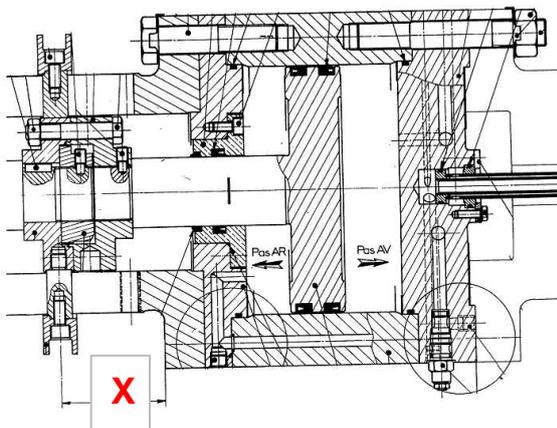
54	91,98	39,36
60	87,58	43,76
66	84,14	47,2
72	80,69	50,65
76	78,22	53,12
82	74,91	56,43
87	71,84	59,5
91	69,61	61,73
95	67,16	64,18
100	64,72	66,62

Suite à ces relevés, nous devons maintenant en déduire l'angle de pas de l'hélice pour chaque position du tiller, cet angle de pas nous permettra par la suite d'en déduire le pas réel de l'hélice.

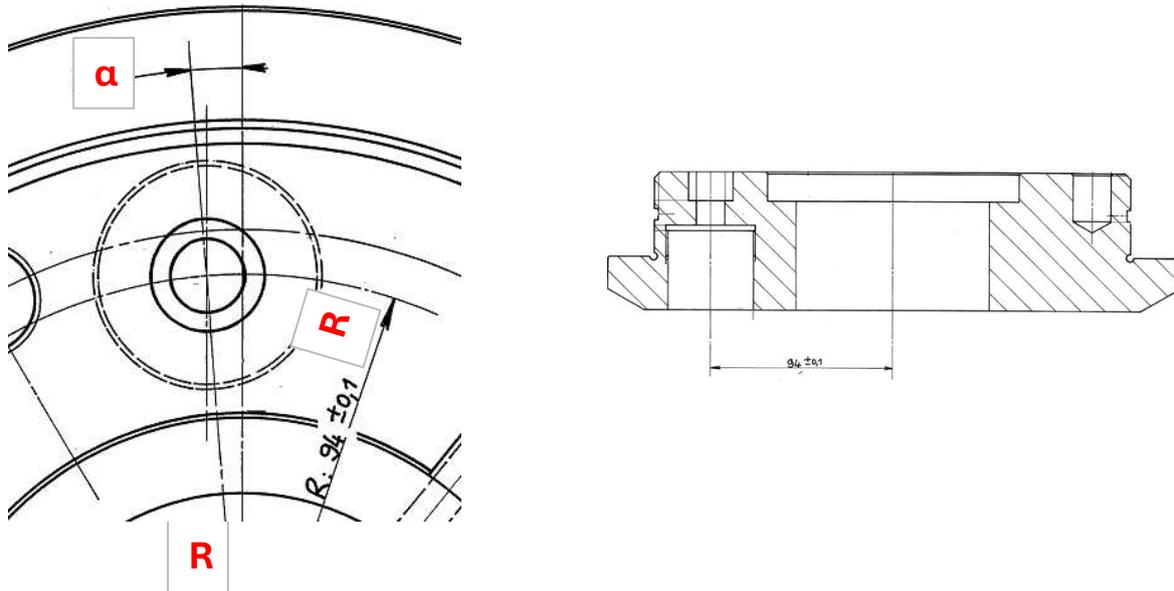
Pour connaître l'angle de pas de l'hélice, il nous faut 3 éléments :

- La course du vérin (déplacement du piston vu précédemment) **X**
- La position linéaire du doigt de manœuvre **R**
- La position angulaire du doigt de manœuvre α

⚠ R et α sont différents pour chaque modèle d'hélice à pas variable et sont indiqués sur les plans des pivots de manœuvre.



Le pas de l'hélice est fonction de l'angle du pas calculé et du \varnothing extérieur de l'hélice.



Pour l'HPV804 installée à bord du NAONED nous avons les valeurs suivantes :

- **R** (position linéaire du doigt de manœuvre) = 94 mm
- **α** (position angulaire du doigt de manœuvre) = 4.27°
- **∅** extérieur de l'hélice = 2070 mm

Avec tous ces éléments, nous pouvons maintenant déduire pour chaque position du tiller le Pas hélice associé.

position tiller	Course vérin X (mm)	Angles du Pas (°)	Pas hélice mm
0	0	0,00	0
5	8,14	4,97	406,80
8	10,76	6,56	538,70
11	11,94	7,28	598,41
15	14,93	9,11	750,81
18	16,7	10,19	841,93
21	18,64	11,38	942,73
23	20,57	12,57	1044,11
26	22,46	13,74	1144,61
29	23,93	14,65	1223,70
32	26,05	15,96	1339,35
35	27,98	17,17	1446,46
38	29,83	18,33	1550,93
41	31,36	19,29	1638,80
45	33,94	20,92	1790,31
49	36,46	22,54	1942,81
54	39,36	24,41	2124,65
60	43,76	27,29	2415,79
66	47,2	29,59	2658,78
72	50,65	31,94	2918,93
76	53,12	33,65	3117,15
82	56,43	36,00	3401,38
87	59,5	38,22	3687,68
91	61,73	39,88	3911,99
95	64,18	41,74	4177,19
100	66,62	43,64	4464,38

Suite à tout cela, les essais de traction au point fixe ont pu être réalisés le 17 Juin 2024 et ont permis de mettre en corrélation, la position du tiller, le pas d'hélice et la valeur de traction associée. A la demande des autres intervenant du projet, la pression de suralimentation du turbo a aussi été prise en compte.

position tiller	pression suralimentation TURBO (BAR)	traction DaN
17	0,12	2000
24	0,14	3200
29	0,17	4100
36	0,25	5800
42	0,39	7000
43	0,44	8100
48	0,71	9200
52	0,85	10900
55	0,85	11000

Vitesse moteur
pendant l'essai de
traction : 764 rpm

Les résultats de cet essai au point fixe ont été utilisés pour, entre autres identifier, le modèle énergétique du moteur ABC ainsi que certains autres paramètres du simulateur EcoBoatTwin.

8. WP-B – Optimisation du train de pêche

1. Modélisation des engins de pêche

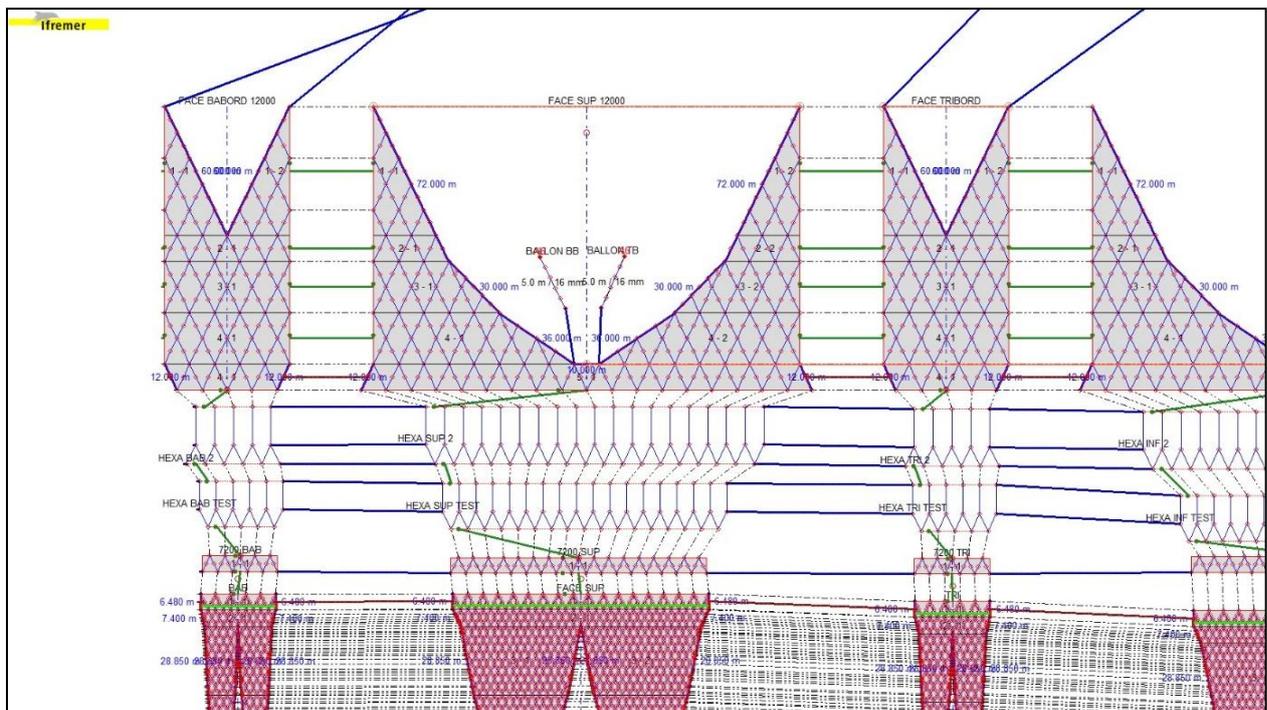
Le NAONED met en œuvre au cours de l'année différents engins de pêche « arts trainants ».

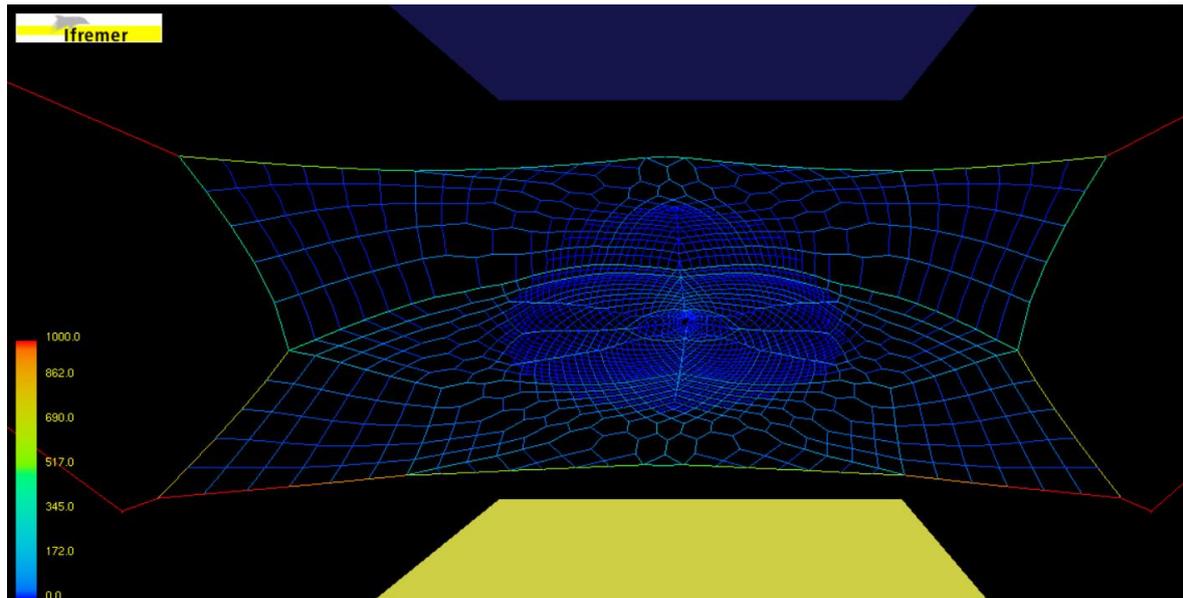
Lors du projet HYBA, le NAONED a principalement ciblé des espèces pélagiques thons germans, obèses « patudo » et rouges, espadons et merlus à l'aide de grands chaluts remorqués avec un autre chalutier le DOLMEN, il s'agit d'une pêche en « bœuf ».

Les performances des engins de pêches utilisés ont été mesurées et collectées tout au long des campagnes de pêche : profondeur du capteur et ouverture verticale.

Elles ont permis de calibrer la modélisation numérique des engins.

Le simulateur DynamiT développé par l'Ifremer a été utilisé pour simuler les engins de pêches et calculer la **résistance à l'avancement**, de ces équipements, sur la base des gréments et plans de chaluts fournis par le patron du navire.





De nombreuses variantes de mise en œuvre peuvent être étudiées grâce aux simulateurs.

- Longueur de câble de remorquage mis à l'eau (filage)
- Ecart latéral entre les chalutiers
- Vitesse de remorquage

Cette paire de chalutier, utilise constamment le même gréement et ne fait pas varier la longueur de câble de remorquage, de plus afin de maintenir la « bonne » géométrie du chalut (performance verticale/horizontale) la distance entre les bateaux est identique à filage constant.

Ainsi seule la variation de la **vitesse de remorquage, en nœuds**, a été simulée sur la base des données de vitesse de surface enregistrées par le navire lors des phases de pêche.

La résistance à l'avancement se traduit dans le simulateur par une **tension dans les câbles de remorquage au niveau, en kilogramme force**, au niveau des poulies et modélisé selon trois axes.

La résultante de ces tensions est la **traction totale, en kilogramme force**, sur l'axe longitudinal.

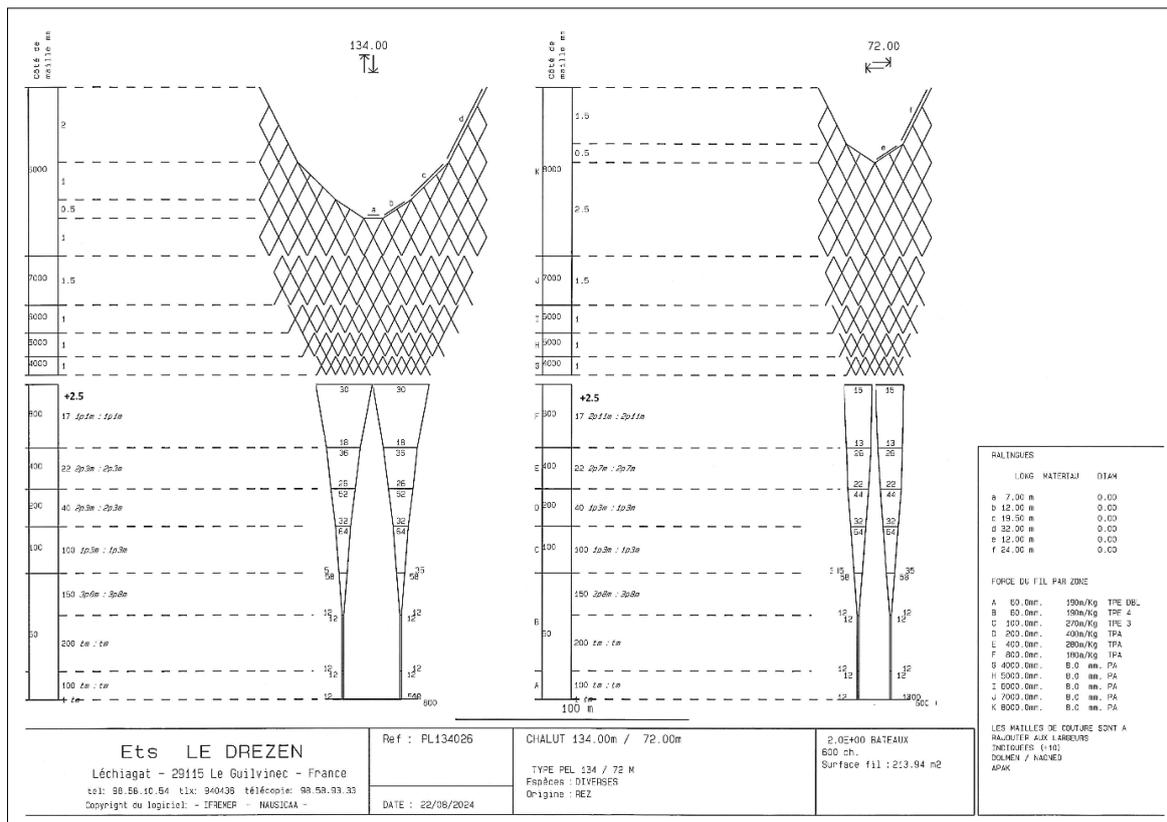
Au chalut pélagique seule une tension est à prendre en compte par bateau. La traction totale s'applique aux deux chalutiers.

Les données brutes de simulation du couple vitesse/résistance à l'avancement ont été interfacées dans le jumeau numérique du navire.

2. Chalut pélagique à thons :

Il s'agit d'un chalut classique utilisé sur cette pêcherie, de taille moyenne pour pouvoir être remorqué de 4.5 à 6 noeuds. Il se caractérise notamment par une ralingue supérieure ou corde de dos de 134.00 mètres et de ralingues de côtés ou têtères de 72 mètres, pour une longueur totale de 262 mètres.

Il est composé sur la moitié de sa longueur d'un ensemble de cordes de grandes dimensions 9.00 à 3.20 mètres façonnées à la main puis sur l'autre moitié de filets fabriqués mécaniquement soit un réseau de mailles étirées de 1.60 à 0.12 mètre dans la poche qui représentent au total une superficie à remorquer de 212 mètres carrés.



Lors de précédents projets de chaluts pélagiques chez LE DREZEN, il a été établi un **facteur de correction** à appliquer sur l'engin simulé afin de retrouver les mêmes résistances à l'avancement que celles mesurées in situ. En raison de l'importante filtration d'eau rencontrées dans ces engins de grandes dimensions, **la partie filet est à minorer : on divise le diamètre des fils constitutifs par 4.**

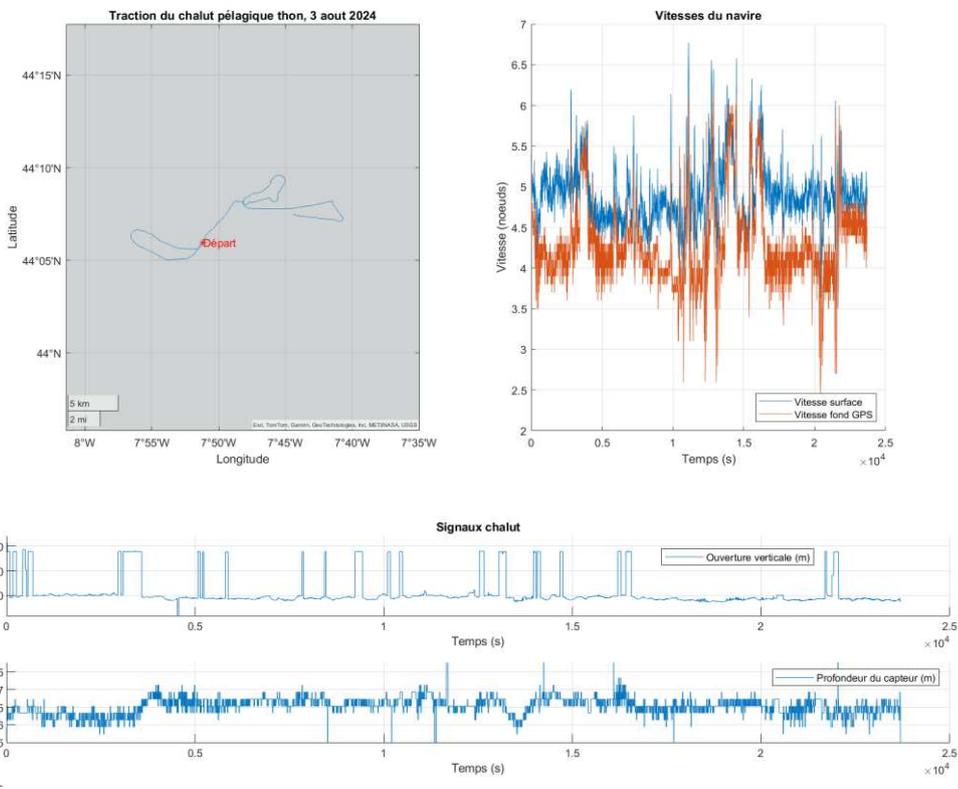
L'ouverture horizontale attendue pour ce chalut est de 84 mètres.

Il est mis en œuvre avec 200 mètres de fourches, 200 mètres de funes et 900 kg de lest. L'écart à respecter entre les bateaux dans cette configuration pour maintenir les performances du chalut est de 324 mètres.

Evolution de la tension sur la fune du chalutier bâbord en fonction de la vitesse de remorquage

Vitesse surface (nœuds)	Ouverture verticale (mètres)	Tension câble (kgf)	Axe X transversal (kgf)	Axe Y vertical (kgf)	Axe Z longitudinal (kgf)
4	54,8	2 937	- 733	- 325	2 825
4,1	53,4	3 062	- 764	- 334	2 946
4,2	52,1	3 191	- 796	- 340	3 071
4,3	50,8	3 324	- 829	- 345	3 200
4,4	49,5	3 461	- 864	- 349	3 333
4,5	48,4	3 602	- 899	- 353	3 469
4,6	47,2	3 746	- 935	- 357	3 609
4,7	46,1	3 894	- 972	- 361	3 753
4,8	45,1	4 046	- 1 010	- 365	3 900
4,9	44,1	4 201	- 1 049	- 369	4 050
5	43,1	4 360	- 1 089	- 373	4 205
5,1	42,2	4 524	- 1 130	- 378	4 362
5,2	41,3	4 690	- 1 172	- 382	4 504
5,3	40,4	4 860	- 1 214	- 387	4 689
5,4	39,6	5 034	- 1 258	- 392	4 857
5,5	38,7	5 211	- 1 302	- 396	5 028
5,6	38	5 392	- 1 348	- 401	5 203
5,7	37,2	5 576	- 1 394	- 406	5 382
5,8	36,4	5 764	- 1 491	- 411	5 563
5,9	35,7	5 955	- 1 489	- 415	5 748
6	35	6 149	- 1 537	- 420	5 936

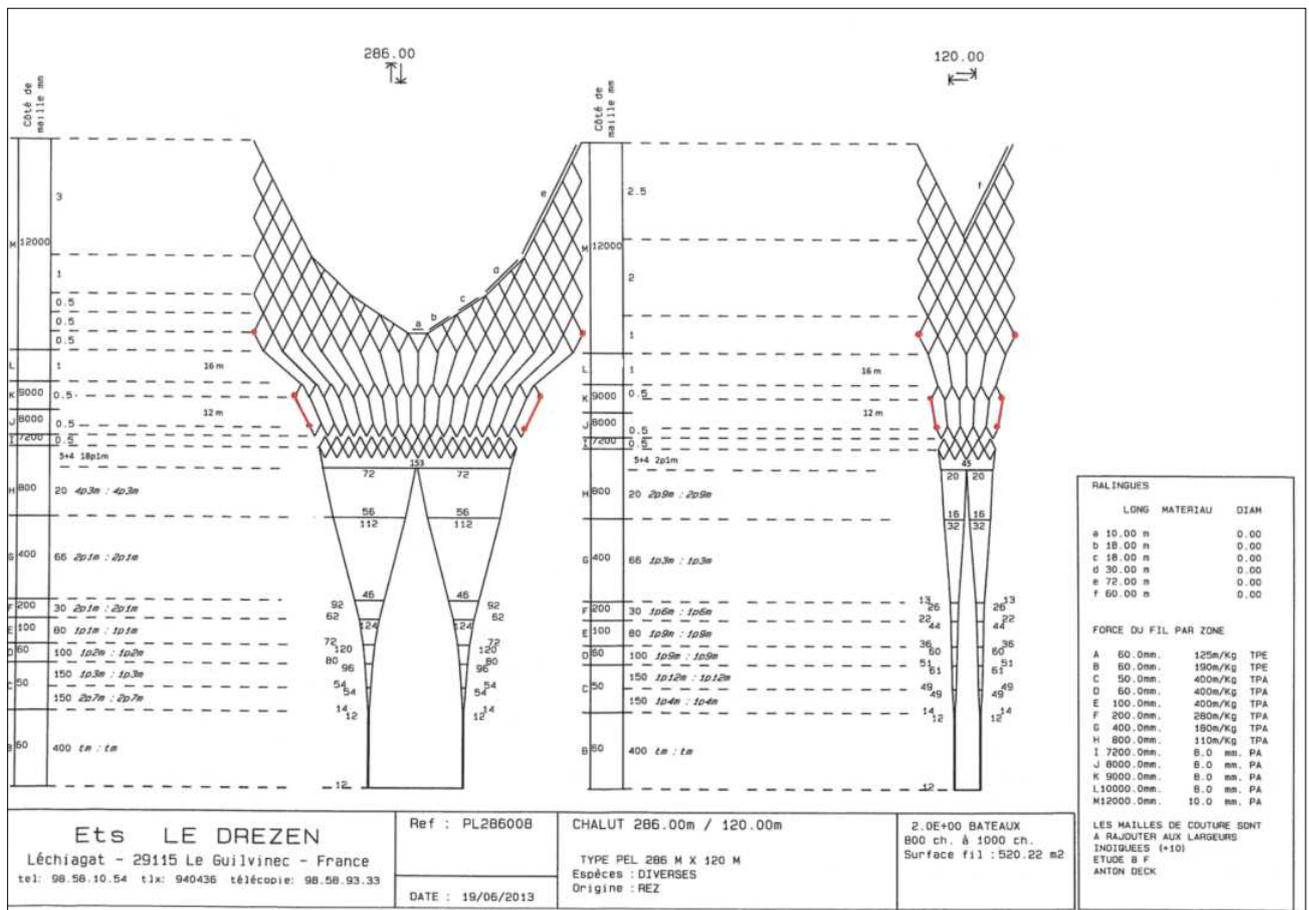
Campagne de mesure :



3. Chalut pélagique à merlus :

Il s'agit d'un chalut de très grandes dimensions par rapport à ceux utilisés classiquement sur cette pêcherie, il peut être remorqué à 2.5 à 3 nœuds, mais peut s'avérer inutilisable en cas de fort courant. Il se caractérise notamment par une ralingue supérieure ou corde de dos de 286.00 mètres et de ralingues de côtés ou têtieres de 120 mètres, pour une longueur totale de 396 mètres.

Il est composé sur la moitié de sa longueur d'un ensemble de cordes de grandes dimensions 12.00 à 7.20 mètres façonnées à la main puis sur l'autre moitié de filets fabriqués mécaniquement soit un réseau de mailles étirées de 1.60 à 0.12 mètre dans la poche qui représentent au total une superficie à remorquer de 520 mètres carrés.



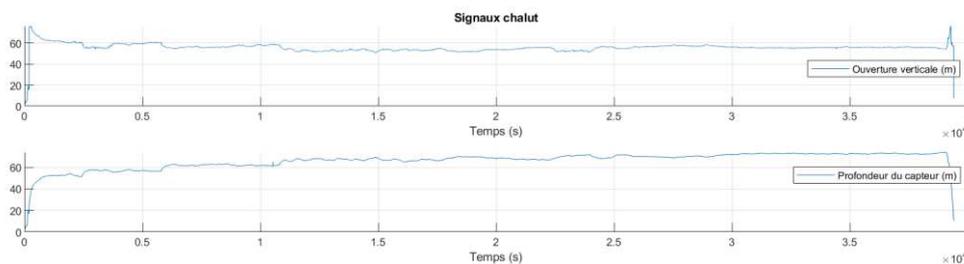
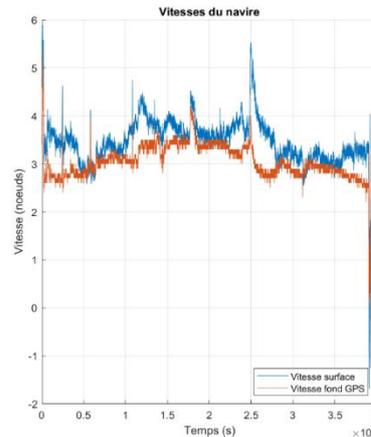
L'ouverture horizontale attendue pour ce chalut est de 178 mètres.

Il est mis en œuvre avec 200 mètres de fourches, 200 mètres de funes et 1 500 kg de lest. L'écart à respecter entre les bateaux dans cette configuration pour maintenir les performances du chalut est de 418 mètres.

Evolution de la tension sur la fune du chalutier bâbord en fonction de la vitesse de remorquage

Vitesse surface (nœuds)	Ouverture verticale (mètres)	Tension câble (kgf)	Axe X transversal (kgf)	Axe Y vertical (kgf)	Axe Z longitudinal (kgf)
2,5	78,4	3 045	- 819	- 1 124	2 709
2,6	75,7	3 194	- 859	- 1 162	2 848
2,7	72,5	3 354	- 904	- 1 187	3 004
2,8	69,5	3 526	- 954	- 1 205	3 173
2,9	66,7	3 706	- 1 007	- 1 217	3 353
3	63,8	3 897	- 1 069	- 1 151	3 567
3,1	61,9	4 108	- 1 128	- 1 197	3 764
3,2	60,1	4 317	- 1 189	- 1 227	3 965
3,3	58,3	4 573	- 1 269	- 1 244	4 213
3,4	56,9	4 829	- 1 346	- 1 270	4 461
3,5	55,5	5 082	- 1 422	- 1 272	4 711
3,6	54,2	5 334	- 1 493	- 1 316	4 948
3,7	52,8	5 698	- 1 610	- 1 331	5 301
3,8	52	5 922	- 1 674	- 1 326	5 523
3,9	51	6 302	- 1 792	- 1 350	5 889
4	50,1	6 623	- 1 885	- 1 382	6 197
4,1	49,1	6 802	- 1 933	- 1 416	6 366
4,2	48,3	7 214	- 2 063	- 1 410	6 767
4,3	47,5	7 489	- 2 139	- 1 416	7 036
4,4	46,7	7 860	- 2 250	- 1 450	7 390
4,5	46	8 179	- 2 341	- 1 471	7 697

Campagne de mesure :



4. Chalut de fond :

Lors du projet HYBA, le chalut de fond du NAONED n'a pas été mis en œuvre et aucune mesure n'a pu être prise sur l'exploitation de cet engin.

Cet équipement a fait néanmoins l'objet d'une modélisation numérique qui a permis tout de même en l'absence de d'éléments de calibration, d'étudier un chalut témoin avec différents paramètres de mise en œuvre et leur impact sur la résistance à l'avancement et d'évaluer le gain obtenu sur un chalut optimisé : moins énergivore à performances égales.

Ce chalut dit « à soles » est pratiqué à l'automne pour cibler seiches, encornets, soles et diverses espèces, et remorqué à une vitesse de 3.5 à 4 nœuds.

Il est composé entièrement de filets en Polyéthylène fabriqués mécaniquement avec des mailles décroissantes de 80, 60 et 45 mm pour une superficie à remorquer de 131 mètres carrés.

La dimension du chalut, ralingue supérieure de 29.90 mètres et un bourelet lesté (8.6 kg par mètre avec chainettes) en 5 morceaux de 39.90 mètres est adaptée à la puissance motrice du navire.

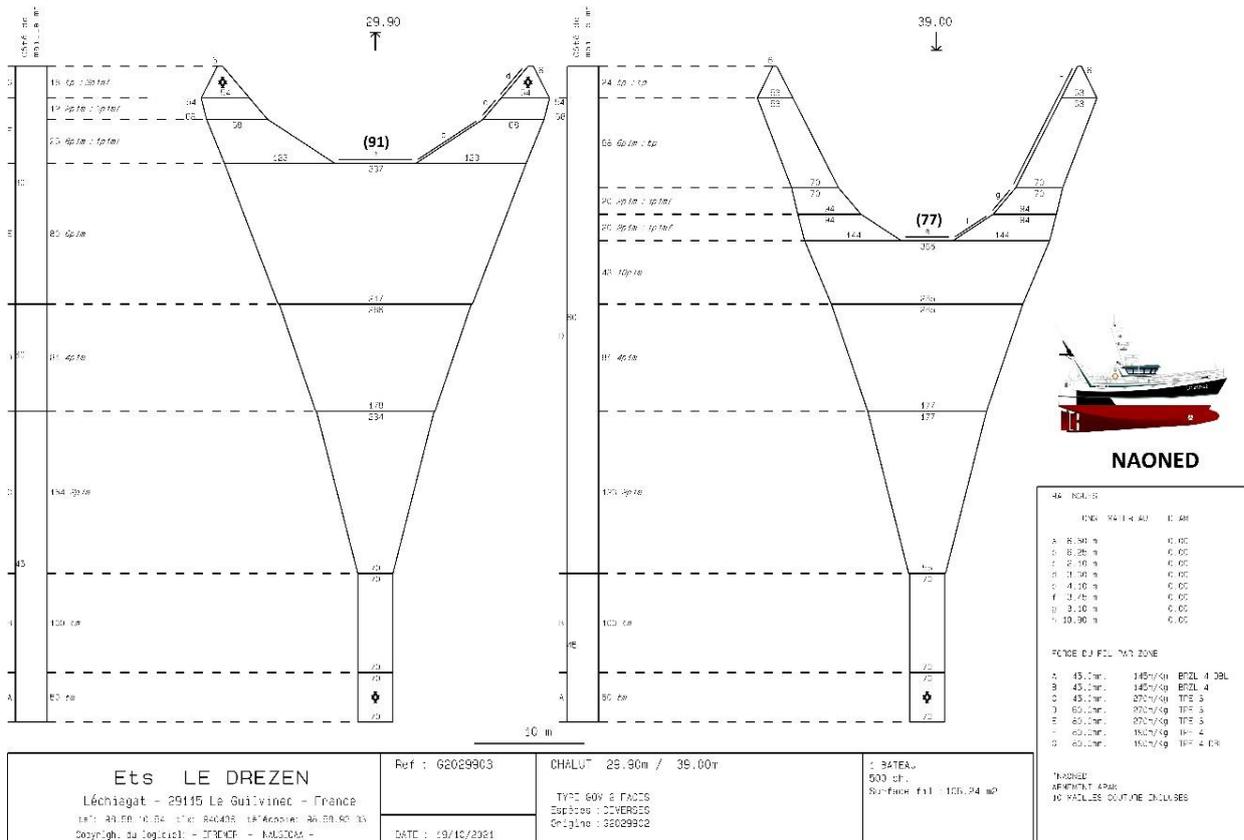
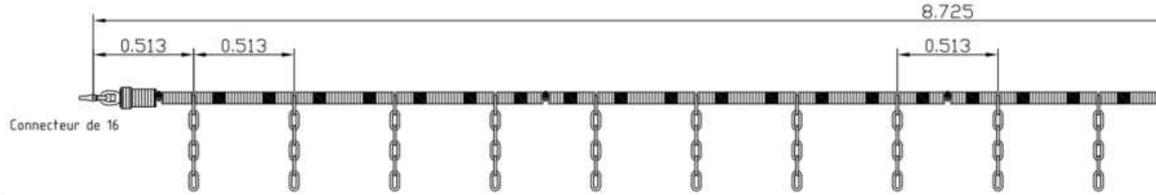


Schéma du bourrelet lesté

Pied d'aile de 8.725m en Ø18mm inox (½ connecteur de 16 compris dans la mesure)

- rondelles de 60 x 25
- entretoises 436C (1,100 kg)
- chainettes HR de 13mm P6 en 6°



Il est mis en œuvre sur des **fonds de 60 mètres avec 275 mètres de funes**, 140 mètres de bras et 30 mètres d'entremises ainsi qu'une paire de panneaux divergents de type OSPREY – MORGERE présentant chacun une superficie de 3.8 mètres carrées pour un poids dans l'air de 1 100 kg. Les panneaux assurent le contact avec le fond du gréement et génèrent un fort rabattement des espèces vivant sur le fond vers le chalut et assurent l'ouverture horizontale de l'engin de pêche.

Evolution de la traction totale en fonction de la vitesse de remorquage

Vitesse surface (nœuds)	Ouverture verticale (mètres)	Ouverture horizontale (mètres)	Ecart panneaux (mètres)	Pose panneau (kgf)	Tension câble (kgf)	Axe X transversal (kgf)	Axe Y vertical (kgf)	Axe Z longitudinal (kgf)	Traction totale (kgf)
3	4,2	18,1	96,9	411	2 817	- 443	- 572	2 723	5 429
3,1	4	18,1	97,8	382	2 954	- 468	- 599	2 855	5 692
3,2	3,8	18,2	98,7	353	3 091	- 493	- 626	2 986	5 954
3,3	3,6	18,2	99,7	323	3 231	- 520	- 653	3 121	6 223
3,4	3,5	18,2	100,7	290	3 382	- 550	- 683	3 267	6 513
3,5	3,5	17,8	100,7	253	3 562	- 579	- 719	3 440	6 861
3,6	3,2	18,3	102,6	224	3 693	- 611	- 744	3 565	7 110
3,7	3,1	18,3	103,6	191	3 849	- 641	- 774	3 716	7 408
3,8	3	18,4	104,2	152	4 033	- 663	- 811	3 895	7 749
3,9	2,9	18,4	104,9	116	4 202	- 703	- 843	4 055	8 076
4	2,8	18,4	105,7	79	4 373	- 745	- 877	4 219	8 410
4,1	2,5	18,4	106,3	40	4 556	- 782	- 912	4 394	8 760
4,2	2,6	18,4	106,9	-	4 728	- 818	- 941	4 561	9 103

Les performances du chalut, l'écart des panneaux et la traction totale concordent avec les résultats attendus, les données recueillis précédemment par le patron lors de campagnes précédentes ainsi que les simulations opérées sur d'autres engins équivalents.

Seule la chaîne de grattage ou « racasseur » placée en amont du chalut pour décoller le poisson du fond afin d'augmenter l'efficacité du chalut n'a pas pu être simulée, son importance dans la résistance à l'avancement pourrait être mesurée in situ avec un dynamomètre immergé.

Les panneaux décollent du fond avec cette configuration à une vitesse de 4.2 nœuds, entraînant avec eux les bras en maillette, la surface balayée par le chalut et son gréement est moindre, réduisant ainsi son efficacité en pêche.

Evolution de la traction totale en fonction de longueur de câble mis à l'eau (filage)

Câble filé (mètres)	Ouverture verticale (mètres)	Ouverture horizontale (mètres)	Ecart panneaux (mètres)	Pose panneau (kgf)	Tension câble (kgf)	Axe X transversal (kgf)	Axe Y vertical (kgf)	Axe Z longitudinal (kgf)	Traction totale (kgf)
275	3,50	17,8	100,7	253	3 562	- 579	- 719	3 340	6 861
250	3,40	17,7	96,9	179	3 539	- 608	- 786	3 397	6 772
225	3,30	16,9	91,6	81	3 548	- 637	- 876	3 379	6 734
200	3,70	16,1	86,0	-	3 550	- 672	- 969	3 348	6 676
175	4,00	15,2	79,9	-	3 582	- 719	- 1 043	3 350	6 679

La pose du panneau, l'appui sur le fond est relativement important, afin de limiter la consommation de carburant lié au frottement du panneau sur le fond, voir même l'enfoncement du panneau dans le substrat, le **filage** pourrait être adapté voir affiné et monitoré avec un enregistreur de vibration SUBWIN – OCTECH.

Un filage plus court permet de décoller les panneaux du fonds, il permet donc un gain substantiel de 2 à 3 % sur la traction totale, mais il réduit la surface balayée par le couple gréement chalut et donc la capturabilité des espèces.

On pourra modifier l'**angle d'attaque** du panneau (réglage au niveau du braguet) pour obtenir un écart optimal dans cette configuration.

Optimisation du chalut :

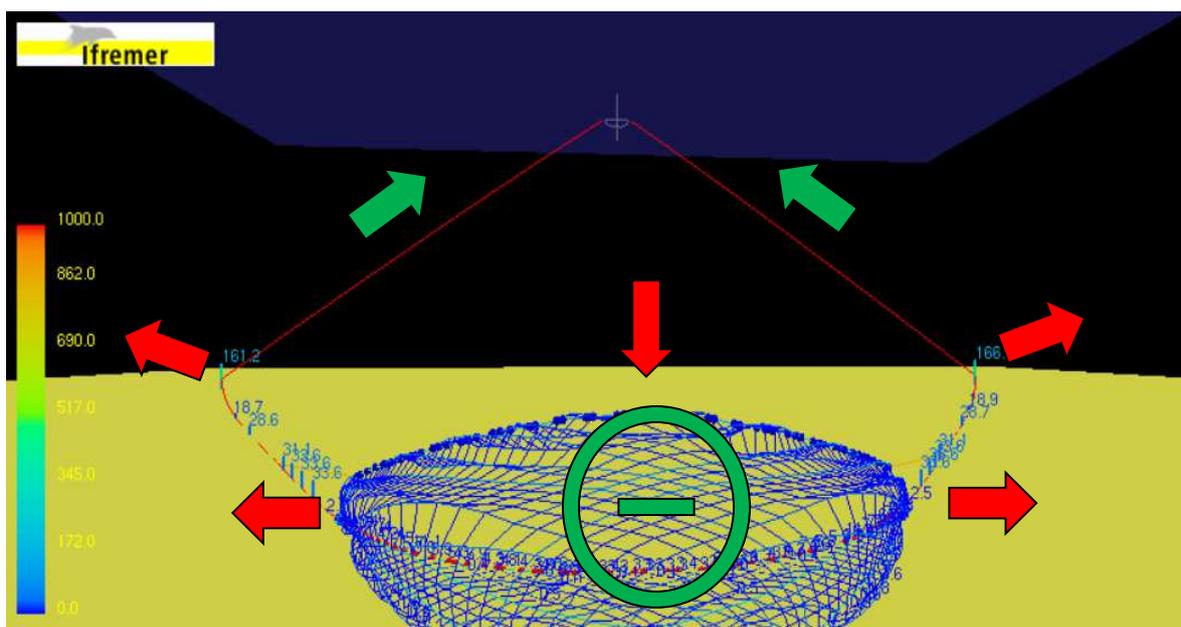
- Optimisation du design, coupe et forme globale pour avoir un chalut écrasé sur le fond
- Optimisation de la répartition des tensions avec construction en 4-6 faces
- Réduction de la surface de filet
- Allègement du bourrelet
- Panneaux décollés

Le parti a été pris de conserver le design général de l'engin afin de garantir une meilleure acceptation par l'équipage : pas de rythme de coupe alambiqué (angle des pièces), pas de construction en 4 et 6 faces complexe à réparer.

La réduction de la résistance à l'avancement a été obtenue principalement par l'allègement de la toile du chalut, dans la limite du raisonnable : pas de perte commerciale, pas de risque de casse ni de problème d'emmêlement, produits accessibles financièrement.

- Les parties inférieures soumises à l'abrasion n'ont pas été modifiées
- Les parties supérieures ont été allégées avec des filets en Polyéthylène à Haute Ténacité « Brestorm » qui ont une résistance à la rupture supérieure aux filets classiques en Polyéthylène vert, les filets en PE 3 mm vert (runnage 260 m/kg) ont été remplacés par leur équivalent en terme de résistance à la tension, soit le Brezstorm 1.9 mm (runnage 360 m/kg)
- Les nappes constitutives des ailes supérieures et du grand dos ont été modifiée avec un maillage de 100 mm de côté de maille au lieu du 80 mm.

Le chalut allégé présente une surface de toile de 116 m² soit 11 % de moins que le chalut standard.



Avec des paramètres de simulation identique au chalut standard, le chalut allégé a une moindre résistance à l'avancement, les panneaux s'ouvrent davantage, et déforment le chalut (plus d'ouverture horizontale, moins d'ouverture verticale).

Le chalut allégé a donc été mis en œuvre avec un filage plus court de 250 mètres pour limiter la divergence des panneaux.

Evolution de la traction totale en fonction de la vitesse de remorquage (250 mètres)

Vitesse surface (nœuds)	Ouverture verticale (mètres)	Ouverture horizontale (mètres)	Ecart panneaux (mètres)	Pose panneau (kgf)	Tension câble (kgf)	Axe X transversal (kgf)	Axe Y vertical (kgf)	Axe Z longitudinal (kgf)	Traction totale (kgf)
3	4,2	19	100,9	401	2 590	- 462	- 575	2 482	4 949
3,1	4	19,1	102,5	370	2 702	- 490	- 599	2 588	5 162
3,2	3,9	19,2	103,8	341	2 822	- 518	- 625	2 702	5 389
3,3	3,7	19,3	104,9	311	2 948	- 547	- 652	2 822	5 629
3,4	3,5	19,3	106,1	280	3 074	- 576	- 678	2 942	5 869
3,5	3,4	19,4	107,3	249	3 204	- 607	- 706	3 066	6 116
3,6	3,3	19,4	108,4	216	3 341	- 639	- 735	3 196	6 376
3,7	3,1	19,5	109,4	186	3 487	- 673	- 766	3 335	6 651
3,8	3	19,5	110,5	147	3 631	- 707	- 797	3 471	6 923
3,9	2,9	19,6	111,4	111	3 779	- 741	- 828	3 612	7 204
4	2,8	19,6	112,2	79	3 911	- 778	- 862	3 761	7 501
4,1	2,7	19,6	113	36	4 095	- 815	- 895	3 911	7 801
4,2	2,6	19,6	113,9	-	4 242	- 852	- 920	4 052	8 092

Le chalut allégé avec un filage plus court présente les mêmes performances en pêche que le chalut standard, sur la plage de vitesse de remorquage de l'engin de 3.5 à 4 nœuds, le gain sur la traction totale nécessaire au remorquage du chalut est de **10.6 %**.

On peut accentuer l'allègement du chalut en utilisant des filets en Dyneema (Polyéthylène à Haut Niveau Moléculaire) qui est la fibre textile la plus résistante que l'on peut utiliser dans un chalut, le filet PE Brezstorm 1.9 mm est remplacé par un filet Dyneema de 1.52 mm (runnage 850 m/kg) sur les parties supérieures en maillage 80 et 60 mm et en Dyneema de 1.07 mm (runnage 1 700 m/kg) sur les parties supérieures en maille de 45 mm.

Avec une surface de fil réduite à 108 m² le filage est à nouveau réduit : avec 225 mètres de câble le chalut présente des performances similaires au chalut standard pour une force de remorquage à 3.5 nœuds de 5 803 kgf soit **15.4 % de gain par rapport au chalut standard**.

PE vert

Diamètre Diameter	Métrage Runnage m/kg	Résistance du fil Breaking strength kg
2,5 mm	365	95
3 mm	260	139
4 mm	190	187
5 mm	125	280
6 mm	75	420

Dyneema noué câblé
Twisted knotted Dyneema

Diamètre Diameter	Métrage Runnage m/kg	Résistance du fil Breaking strength kg
210/23 (1,07 mm)	1700	106
210/46 (1,52 mm)	850	190

Hors-Scope HYBA :

- La réduction du poids du bourrelet a été testée mais n'a pas permis d'obtenir du gain significatif.
- L'expérimentation en simulation numérique du gréement mise en place lors du projet REVERSE de l'IFREMER afin de décoller les panneaux du fonds et d'obtenir une réduction de 10 % de consommation de carburant, n'a pas permis d'obtenir de résultats significatifs.
- Lors de ce projet, avec un gréement adapté pour maintenir l'efficacité en pêche, les panneaux évoluaient de 3 – 5 mètres au-dessus du fond.
- Ce résultat n'a été obtenu en simulation sur le chalut optimisé du NAONED qu'avec un filage et une vitesse de remorquage très élevés générant une traction trop importante et donc aucun gain particulier hormis la réduction de la remise en suspension de sédiments.

9. WP- C – Analyse énergétique

- Analyse des données collectées
- Modélisation de la consommation et identification des leviers d'optimisation

1. Implication IMT Atlantique, livrables et workpackages

IMT Atlantique, en collaboration avec le partenaire Vectura System, s'est impliqué dans le Workpackage « WP-C – Analyse Energétique et pré-dimensionnement » du projet HYBA ; les 3 sous-workpackages sont répertoriés dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Les livrables attendus sont :

- **WP-C / WP-7.1 :**
 - L.C.7.1 : Rapport d'analyse sur les données de consommation, base de données et code d'exploitation
- **WP-C / WP-7.2 :**
 - L.C.7.2 : Modèle énergétique numérique « M1 » du chalutier et documentation associée
 - L.C.7.3 : Modèle énergétique numérique « M2 » du chalutier avec une propulsion hybride et documentation associée
 - L.C.7.4 : Rapport d'analyse sur les gains de consommation en carburant basé sur simulation
- **WP-C / WP-8 :**
 - L.C.8.1 : Plan d'expérience, catalogues des scénarios d'exploitation et des signaux
- **WP-C / WP-9 :**
 - L.C.9.1 : Bilan de puissance pour la propulsion hybride
 - L.C.9.2 : Rapport de pré-dimensionnement et choix de composants sur catalogue

Le présent chapitre synthétise les éléments attendus pour ces différents livrables ; Chaque partie fera référence explicitement au livrable qui est adressé.

Des réalisations complémentaires inhérentes à la vie du projet sont aussi présentés dans ce document. Des perspectives sont proposées en fin de rapport, notamment pour mettre en avant les challenges scientifiques et technologiques découverts tout au long de ce projet.

2. Analyse énergétique du navire Naoned dans sa configuration actuelle

Ce paragraphe constitue le livrable L.C.7.1 : Rapport d'analyse sur les données de consommation, base de données et code d'exploitation

WP-7.1 Traitement des données de consommation et analyse – Analyse des signaux

Partenaires impliqués : **IMT Atlantique** et **Vectura System**

Date de démarrage : t0 + 5 mois

Durée : 3 mois

Travaux réalisés :

- Filtrage et mise en forme des données
- Identification des signaux porteurs d'information fondamentale sur la consommation énergétique
- Identification des puissances nominales et maximales sur les différents consommateurs
- Analyse temporelle et fréquentielle des signaux utiles

Livrables :

L C.7.1 : Rapport d'analyse sur les données de consommation, base de données et code d'exploitation

a. Objectif

Ces travaux valorisent directement l'instrumentation réalisée dans le WP-A. L'objectif de cette phase est double :

1. d'une part, l'objectif était de pouvoir comprendre et analyser la consommation énergétique du Naoned, directement à partir des données ; par exemple, être capable de constituer un diagramme de flux d'énergie, de la source énergie carburant jusqu'aux différents consommateurs (propulsion, groupes électrogènes...).
2. d'autre part, l'objectif était de classifier et identifier (retrouver leur valeur) les signaux (mesures) et paramètres (caractéristiques physiques dimensionnantes) du navire (vitesse, masse...) ou de son environnement (état de mer, présence ou non du chalut) impactant significativement la consommation énergétique du navire.

b. Méthodologie

L'instrumentation installé sur le Naoned transmet des informations quotidiennes. Ce flux d'information permettra à terme d'avoir une analyse statistique des données (« big data »), mais étant donné les compétences des membres du projet d'une part, et la volonté de comprendre « finement » les phénomènes physiques d'autre part, la méthodologie suivante a été mise en œuvre pour l'analyse de ces données :

- Sur la base des discussions avec les marins-pêcheurs, nous avons identifiés des « missions-types » en lien direct avec une activité de pêche ; les différents types de pêches pratiqués par le Naoned sont assez dimensionnants d'un point de vue énergétique de par la durée de la mission et la nature des activités de pêche (type de filet, pêche « en bœufs » ou en solo, vitesse de chalutage...).
- Une analyse manuelle des données a permis ensuite d'extraire des enregistrements de données « type » pour ces différentes missions ; comprendre finement ces missions fondamentales permet de comprendre quasi-intégralement la vie du navire, qui en première approximation répète ces différentes missions.

Les missions-types retenues étaient initialement :

- Pêche au pélagique – thon : les données du mois de juillet 2024 ont été retenues.
- Pêche au pélagique – merlu : les données du mois de novembre 2024 ont été retenues.
- Pêche au chalut de fond : aucune campagne de pêche n'a finalement été mise en œuvre durant la phase d'observation. Des mesures partielles – sur le chalut et la consommation de carburant – ont toutefois pu être extraites sur des mesures réalisées en amont du projet, avec l'instrumentation déjà en place sur le navire.

Chacune de ses missions d'une durée de 10 à 15 jours s'organisent selon les phases suivantes :

- Navigation aller
- Phase(s) de pêche : filage, traction chalut, virage
- Navigation retour

A noter que des mesures ont aussi été exploitées en dehors de ces grandes missions de pêche types, par exemple pour étudier l'impact de l'état de mer sur les consommations (*cf.* paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

c. Analyse des trois missions-types de pêches

1. Pêche au thon - Juillet 2024

La période de pêche au thon étudiée a eu lieu du 22 juillet au 5 août 2024. Elle se décompose en deux phases de navigation qui correspondent aux aller et retour entre Lorient et la zone de pêche au large de l'Espagne, et d'une phase d'alternance de phases de pêche et de périodes de navigation pendant lesquelles le chalut est remonté à bord.

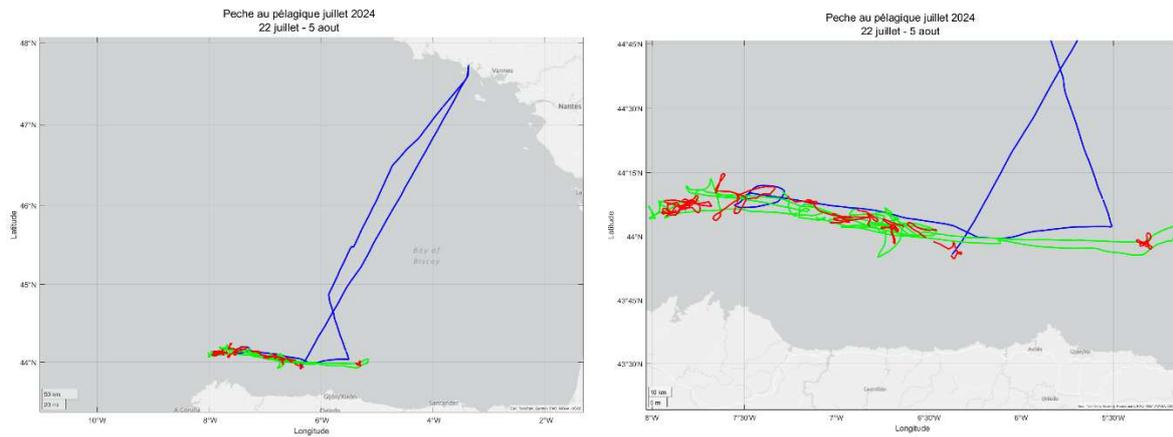


Figure 1. Trajectoire du Naoned pour la pêche au pélagique (thon) juillet 2024 – Bleu (navigation), rouge (pêche), vert (navigation entre les phases de pêche)

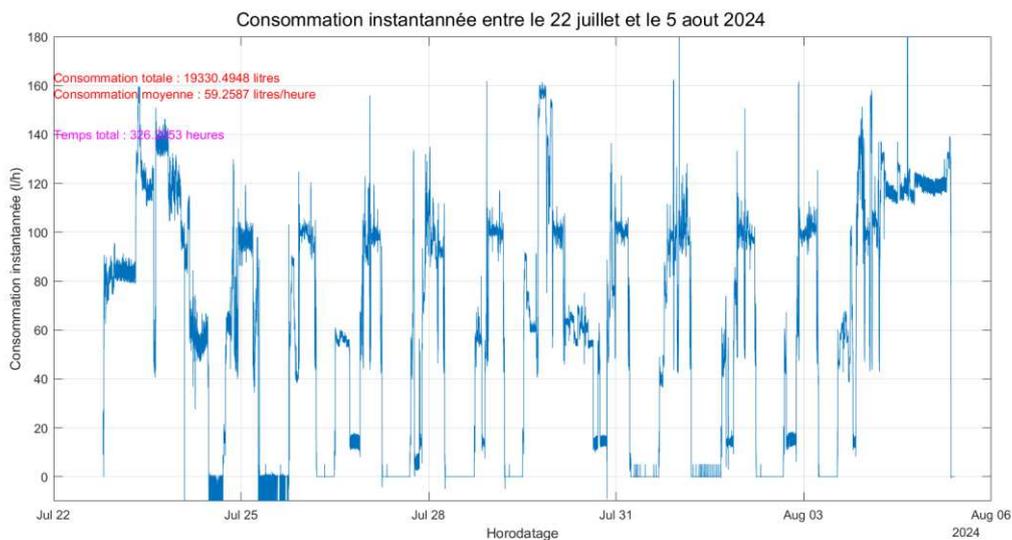


Figure 2. Consommation instantanée "brute" du moteur thermique principal durant la période pêche de juillet 2024.

La Figure 1 montre la trajectoire du navire et ses différentes phases de pêche. La Figure 2 montre l'évolution de la consommation instantanée en fonction du temps sur toute la période de pêche.

2. Pêche au merlu - Novembre 2024

La période de pêche au merlu étudiée a eu lieu du 5 novembre au 14 novembre 2024. Elle se décompose en plusieurs phases de navigation qui correspondent aux aller et retour entre Lorient et La Guilvinec et la zone de pêche au large du Finistère, et de plusieurs phases d'alternance de pêche et de périodes de navigation pendant lesquelles le chalut est remonté à bord.

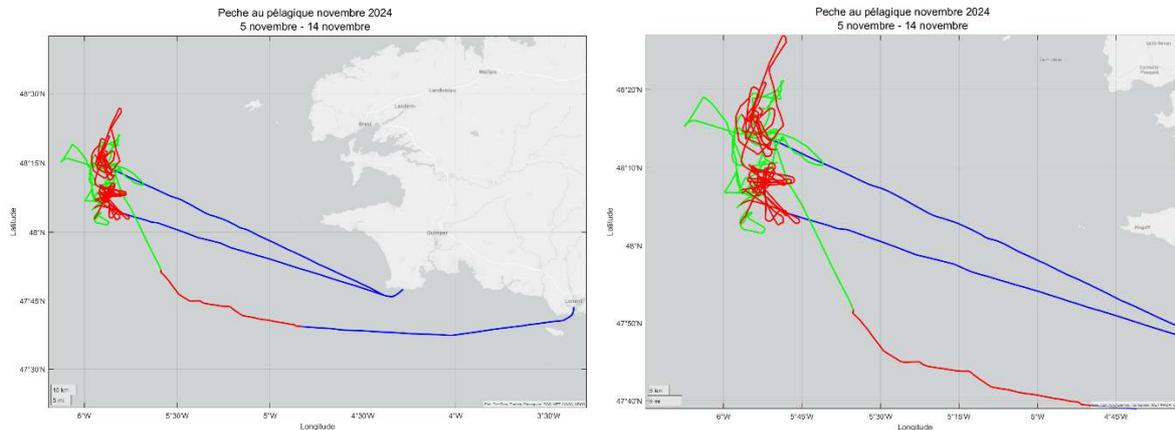


Figure 3. Trajectoire du Naoned pour la pêche au pélagique (merlu) novembre 2024 – Bleu (navigation), rouge (pêche), vert (navigation entre les phases de pêche)

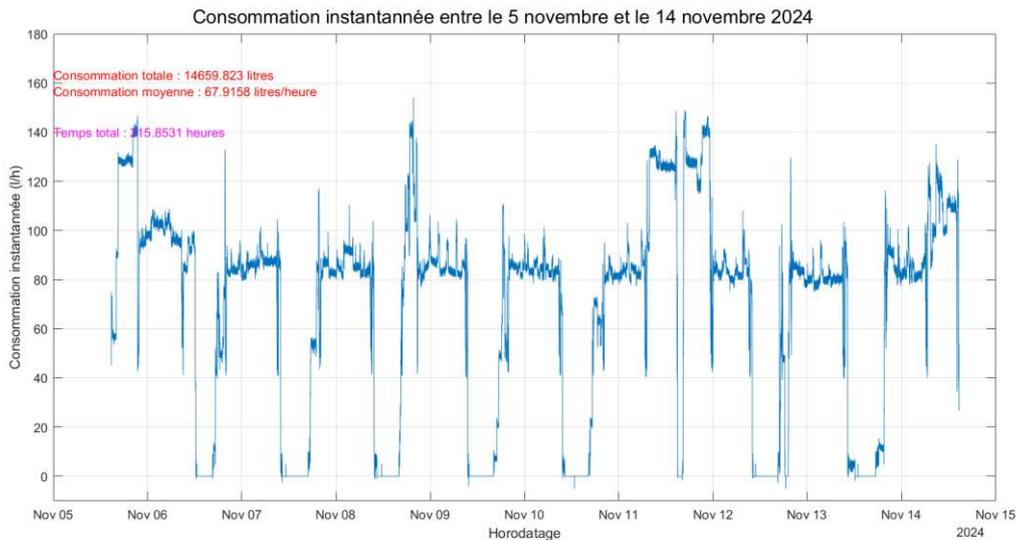


Figure 4. Consommation instantanée "brute" du moteur thermique principal durant la période pêche de novembre 2024.

La Figure 3 montre la trajectoire du navire et ces différentes phases. La Figure 4 montre l'évolution de la consommation instantanée en fonction du temps sur toute la période de pêche. La consommation moyenne est plus élevée par rapport à la pêche au thon de juillet.

3. Pêche au chalut de fond – janvier 2022

Ces données ont été estimées à partir d’une pêche de 12 jours en janvier 2022. Les données sont celles d'un système équipant le Naoned avant le projet HYBA. Elles s’avèrent exploitables pour la répartition des consommations.

4. Répartition des consommations

A partir de ces données, on peut calculer la répartition de la consommation du moteur principal entre les différentes phases d'utilisation du bateau. La Figure 5 montre cette répartition. Les phases de filage et de virage n'absorbent que 4% de la quantité totale de carburant. Les rapports entre les consommations en navigation et en traction de chalut sont presque inversés si on compare les deux types de pêche. Cela s'explique par le temps passé à tracter le chalut, plus long en proportion pour la pêche au merlu. On voit cette différence sur la Figure 6. Le temps passé à tracter le chalut est de 15% pour le thon et 47% pour le merlu. Pour le chalut de fond, les phases de filage et de virage n’ayant pu être déterminées précisément, la valeur de 2% a été reprise des pêches au pélagique.

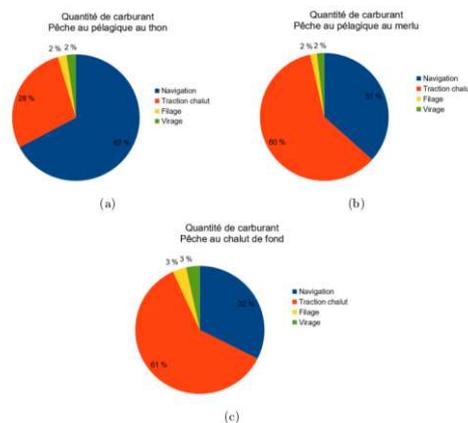


Figure 5. Répartition de la consommation entre les différentes phases d'utilisation du Naoned, pour les trois missions de pêche considérées.

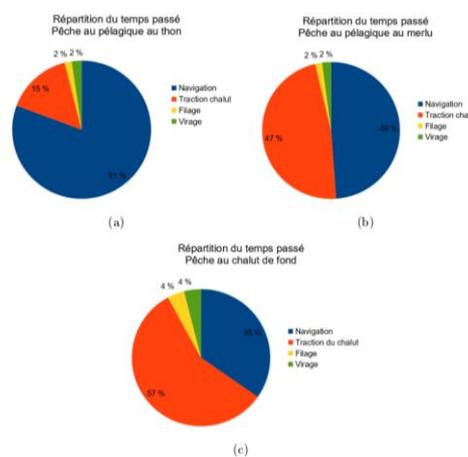


Figure 6. Répartition du temps passé entre les différentes phases d'utilisation du Naoned, pour les trois missions de pêche considérées.

d. Analyse détaillée des consommations

Les résultats de ce paragraphe sont fondamentaux pour les réalisations du WP-C ; ils permettent de définir et caractériser des points de fonctionnements nominaux pour le Naoned, permettant une première compréhension des consommations énergétiques à bord de celui-ci. De plus, ces analyses vont permettre l'identification de signaux et paramètres utiles pour la modélisation énergétique du navire.

1. En navigation

Dans toutes les phases, la vitesse du navire est un facteur important de consommation du bateau. La Figure 7 montre la relation entre consommation instantanée et vitesse relative pour les phases de navigation.

La forme du nuage de points suggère que la consommation est essentiellement liée à la résistance hydrodynamique de la coque car cette forme est caractéristique. Cependant, il y a d'autres facteurs à considérer pour expliquer l'allure de ce nuage, comme les rendements du système de propulsion par exemple. On peut modéliser cette courbe par un ensemble de deux droites dont l'intersection a lieu pour une vitesse d'environ 7 noeuds, vitesse économique connue par les marins sous le noms de "vitesse de ligne". On peut construire un modèle plus évolué, ici par exemple un polynôme de degré 3 en la vitesse longitudinale du navire, ce qui est cohérent avec les équations de la physique.

L'histogramme des vitesses de la Figure 7 montre que le navire passe beaucoup de temps à vitesse nulle et beaucoup de temps entre 6 et 10 noeuds, en proportion. Il faut cependant considérer la quantité de carburant associée à chaque vitesse, en plus du temps passé, pour se faire une idée de la vitesse qui correspond à la quantité de carburant la plus importante. La Figure 8 montre l'histogramme de la quantité de carburant absorbée par le moteur en fonction de la vitesse. On voit que malgré le temps passé à vitesse nulle, la quantité de carburant associée est négligeable, et que **la majorité du carburant est absorbée pour des vitesses supérieures à 8 noeuds.**

Cette étude permet de dégager une gamme de vitesses du navire pour laquelle la quantité de carburant est la plus importante : la navigation à des vitesses supérieures à 6 noeuds.

Note : Le moteur a été restauré début octobre 2024 : 3 cylindres ont été refait. On peut voir l'effet de cette restauration sur la Figure 9 où on voit la consommation plus faible pour les plus fortes charges. La différence ne sera prise en compte que sur certaines analyses précises spécifiques.

2. En pêche

Lors des phases de pêche au pélagique, le profil de consommation est différent de celui pour les phases de navigation, voir la Figure 10. On peut ainsi déterminer les barycentres des tâches jaunes et oranges de cette figure, et terminer ainsi en première approximation les points de fonctionnement nominaux du Tableau 1. Pour le chalut de fond, Les données du système Amarrée® recueillies en 2022 et les témoignages des marins permettent de connaître la vitesse moyenne de traction du chalut de fond : 3.2 noeuds et la consommation moyenne associée : 105 l/h.

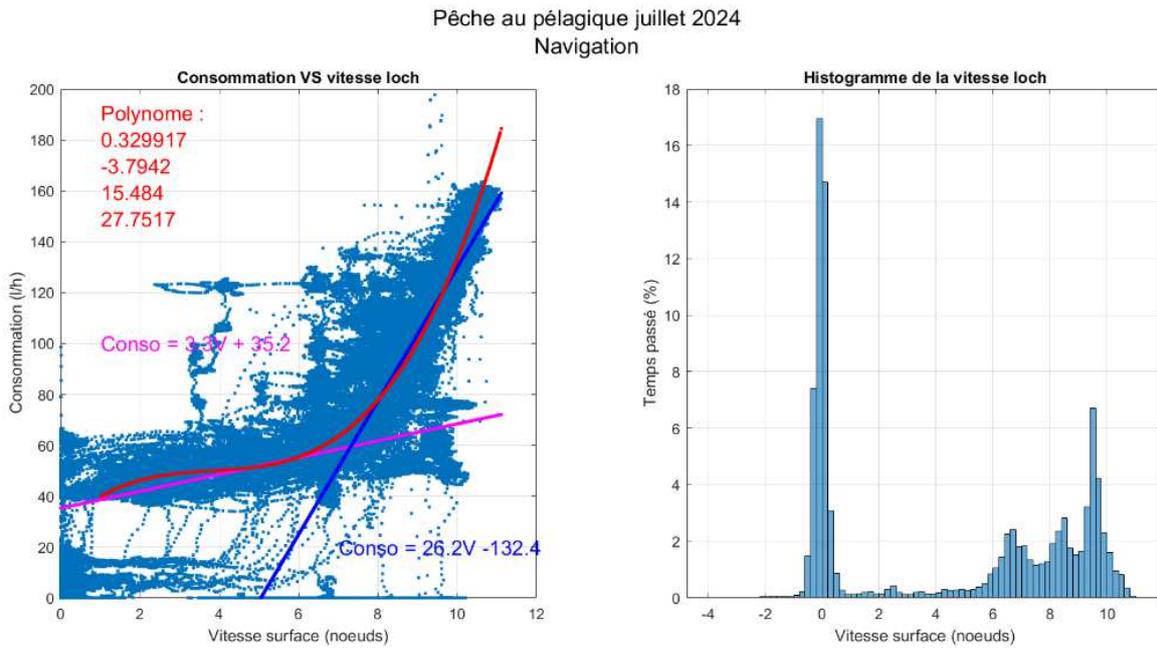


Figure 7. Consommation instantanée fonction de la vitesse relative (gauche) ; Histogramme des temps passés pour chaque vitesse en pourcentage du temps total (droite). Agrégat des données des phases de navigation et inter-filages.

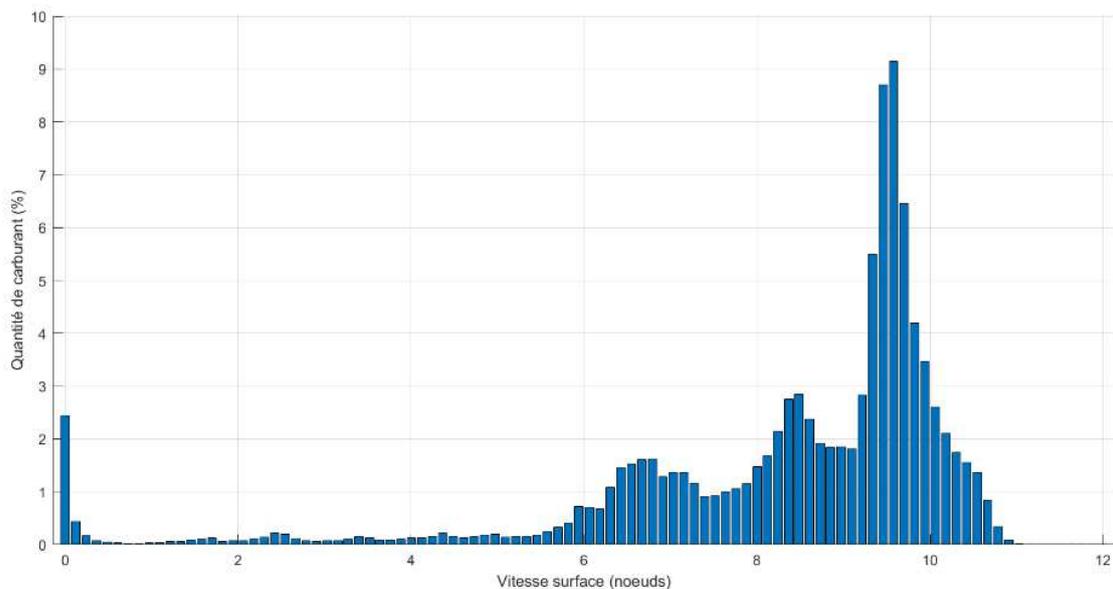


Figure 8. Histogramme des quantités de carburant consommées fonction de la vitesse relative en navigation (juillet, inter-filages inclus).

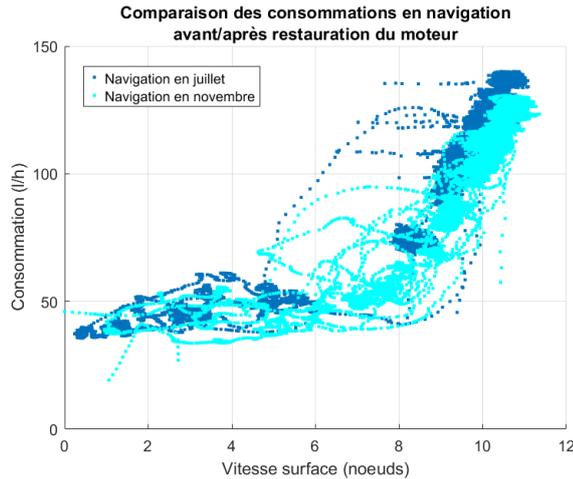


Figure 9. Consommation instantanée fonction de la vitesse relative avant et après la restauration du moteur. Agrégat des données lors des phases de navigation.

3. Conclusion : identification de points de fonctionnement nominaux

En résumé, on peut extraire de ces analyses 4 points de fonctionnement principaux, qui se caractérisent à la fois par des temps longs, et des consommations instantanées élevées. En premier approximation nous pouvons les considérer comme des points de fonctionnement à régime constant ; cf. Tableau 1.

Tableau 1. Points de fonctionnement nominaux pour les 3 types de pêche

Type de pêche	Plage de vitesse nominale	Estimation de consommation
Navigation	[6 , 10] noeuds	[50 , 160] l/h
Pélagique (thon)	[4 , 6] noeuds	100 l/h
Pélagique (merlu)	[2.5 , 4.5] noeuds	90 l/h
Chalut de fond	3.2 noeuds	105 l/h

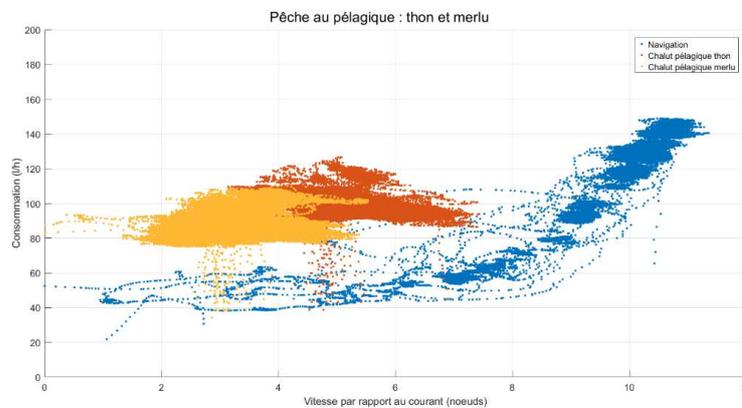


Figure 10. Consommation instantanée fonction de la vitesse pour les phases de traction des chaluts pélagiques (orange – thon, jaune – merlu). Des valeurs de consommation en navigation (bleu) sont affichées pour comparaison.

4. Consommations des actionneurs hydrauliques ou consommateurs électriques

Le Tableau 1 résume les points de fonctionnement nominaux, *i.e.* à régime constant typique du fonctionnement du Naoned. Ceci représente les consommations fondamentales. Autour de ces points de fonctionnement en régime permanent, on observe des variations de consommation qui pourraient être exploitées par l'hybridation. Ces variations de consommation peuvent être expliqués par deux sources distinctes :

- Les différents « actionneurs » exploités sur le navire : actionneurs hydrauliques pour les manœuvres sur le chalut (filage et virage), groupes électrogènes, réseaux de bord et consommateurs électriques spécifiques comme la machine à glace.
- Les actions dynamiques du navire comme les changements de direction ou les effets perturbateurs liés aux éléments ; effet de la houle ou du vent par exemple.

Il est nécessaire d'analyser ses différents phénomènes, afin de savoir s'il est nécessaire de les prendre en considération dans la modélisation énergétique du navire, modèle qui servira ensuite à dimensionner l'architecture d'hybridation. Dans ce paragraphe nous analysons tout d'abord les impacts des différents « actionneurs » à bord du navire.

Consommation énergétique des actionneurs hydrauliques (phase pêche – filage et virage)

La Figure 5 apportait déjà une information macroscopique ; selon le type de pêche, le pourcentage de consommation liée aux actionneurs hydrauliques – utilisés lors des actions de filages et de virages, est compris entre 4% (pélagique) et 6% (thon). Au premier regard on pourrait donc considérer ce consommateur comme négligeable au regard de la consommation énergétique totale, et notamment du flux énergétique liée au déplacement du navire, plus éventuellement le chalut.

Toutefois, il est important d'analyser un peu plus précisément les phases de filage et de virage, car d'un point de vue « fonctionnel », il pourrait être intéressant de prévoir matériellement une alimentation purement électrique de ces actionneurs (passage au tout électrique, ou entraînement de la pompe hydraulique) par l'actionneur électrique et non thermique ; **étudier la consommation énergétique total pour ces seuls actionneurs hydrauliques, sur une mission de pêche, permet d'avoir un élément dimensionnant sur la capacité minimale du pack batterie à embarquer à bord du navire**

La Figure 11 montre la comparaison entre les consommations pendant une phase de navigation et les phases de virage, en fonction de la vitesse, pour le pélagique au thon. Différentes courbes ont été ainsi analysées en filage et en virage, pour le pélagique au thon et au merlu.

Les consommations et durées moyennes des deux types de phases sont résumées dans le

Tableau 2. Afin d'estimer les consommations d'énergie totales sur une manœuvre, ou une mission de pêche complète, des calculs comme celui qui suit ont été menés ; dans le cas d'un filage, la surconsommation par rapport à l'absence de sollicitation des actionneurs hydrauliques est de l'ordre de 10 l/h en moyenne. L'énergie associée est donc de l'ordre de $10 \times 10.74 / 60 = 1.79$ kWh. Pour évaluer l'énergie absorbée par les pompes hydrauliques, il faut considérer les rendements du moteur (environ 0.3 à cette charge) et du réducteur (0.96) à cette valeur et on obtient une énergie absorbée par les pompes de $1.79 \times 0.3 \times 0.96 = 0.51$ kWh par filage.

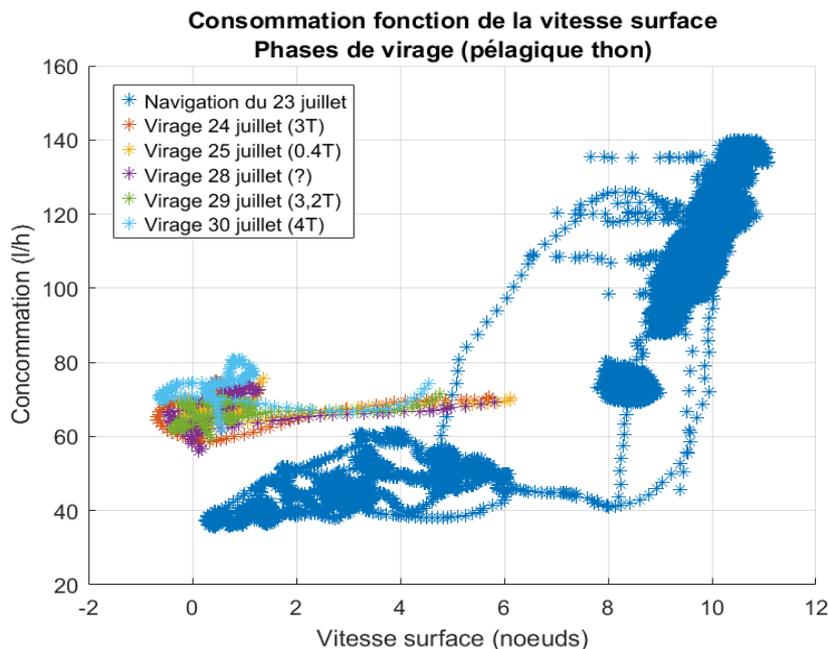


Figure 11. Superposition des consommations lors de la navigation (bleu) et des phases d'actionnement du treuil pour le filage (orange) – cumul de 10 filages pour le thon, 9 filages pour le merlu. Ainsi, sur la période de pêche au thon de juillet, l'énergie totale absorbée par les systèmes hydrauliques pour les filages (14 filages au total) est de 7.1 kWh. De même, sur la période de pêche au merlu de novembre, l'énergie totale absorbée par les systèmes hydrauliques pour les filages (9 filages au total) est de 4.6 kWh.

Dans le cas du virage, il faut considérer en plus le fait que les poissons sont remontés par paquets de 1.5 tonnes pour permettre de les évacuer au fur et à mesure vers la cale, et parce que les systèmes hydrauliques ne peuvent pas remonter un plein filet en une seule fois (parfois plus de 20 tonnes de poisson dans un chalut). Les consommations et durées moyennes sont aussi résumées dans le

Tableau 2. La surconsommation par rapport à l'absence de sollicitation des actionneurs hydrauliques est de l'ordre de 20 l/h à 25 l/h en moyenne. On ne détaillera pas ici les calculs permettant d'estimer la consommation d'énergie totale pour chaque type de mission ; en plus du calcul de l'enroulement des funes, proches des calculs réalisés pour le filage, il faut prendre en considération aussi l'estimation des consommations pour la remontée des poissons à bord

du navire (montée de l'ordre de 4m), multipliée par le nombre de prises et la masse de poissons pris à chaque fois. Comme résumé dans le Tableau 3 :

- sur la période de pêche au thon de juillet, l'énergie totale absorbée par les systèmes hydrauliques pour les virages est de 42.2 kWh,
- sur la période de pêche au merlu de novembre, l'énergie totale absorbée par les systèmes hydrauliques pour les virages est de 54.2 kWh.

Tableau 2. Consommation et temps de manoeuvre - moyenne et écart-type - pour le filage et le virage, pour la pêche pélagique

Action / Pêche	Conso. moy +/- std	Temps manoeuvre +/- std
Filage / Merlu	66 +/- 12 l/h	55 +/- 12 s
Filage / Thon	71 +/- 14 l/h	67 +/- 17 s
Virage / Merlu	78 +/- 10 l/h	352 +/- 70 s
Virage / Thon	75 +/- 12 l/h	177 +/- 15 s

Tableau 3. Bilan des consommations énergétiques des systèmes hydrauliques par filage et virage, pour une mission de pêche type pélagique

Type de Pêche	Action	Energie totale consommée sur une action	Energie totale consommée sur une mission
Merlu	Filage	4.6 kWh	58.8 kWh
	Virage	54.2 kWh	
Thon	Filage	7.1 kWh	49.3 kWh
	Virage	42.2 kWh	

Conclusion sur la consommation énergétique des actionneurs hydrauliques (phase pêche – filage et virage)

Les chiffres de consommation estimés au total sur une mission, ou sur les actions individuelles (1 filage / 1 virage) peuvent être dimensionnant pour le choix de la batterie ; pour décider s'il est intéressant / possible techniquement d'envisager ces actions sur la seule énergétique batterie, et de dimensionner le cas échéant le pack batterie en conséquence.

Les pics d'appel d'énergie lors des différentes manoeuvres ont été aussi pris en considération au niveau du simulateur, pour régler la loi d'optimisation énergétique.

Consommation des moteurs auxiliaire et de mouillage

Pour rappel, la structure de la motorisation du Naoned peut se résumer comme proposée dans la Figure 12. Les moteurs auxiliaires et de mouillage sont finalement peu exploités sur une mission de pêche. Au regard de leur temps d’allumage et de leur consommation, il a été estimé sur la période du 15 juillet 2024 au 17 décembre 2024 qu’ils **représentaient une consommation de diesel d’à peine 1% de la consommation totale du Naoned.**

Lors de la transformation du navire, leur éventuel échange contre une source d’énergie électrique sera donc guidé par des considérations fonctionnelles, mais pas pour des objectifs d’optimisation énergétique.

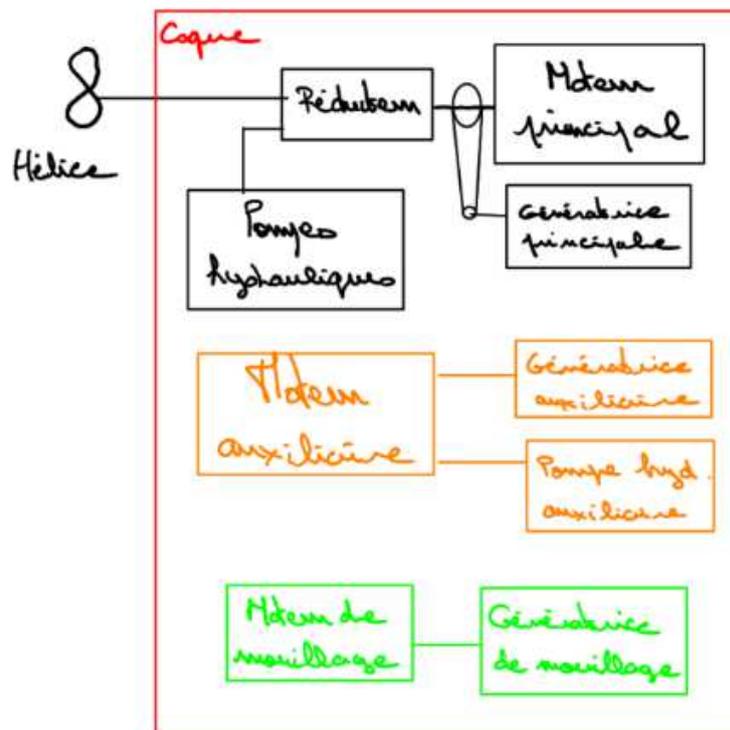


Figure 12. Structure simplifiée du Naoned

Consommation électrique : issue des génératrices principale ou auxiliaires (dont mouillage)

L’instrumentation du réseau triphasé à bord du navire a été complexe à calibrer. Les premières estimations aboutissent à une puissance de base de 4 kW en électrique, qui ramené à la puissance mécanique peut être estimée à 5 kW. A noter que le démarrage de la machine à glace peut engendre des surconsommations de 30%, mais étant donné la très faible occurrence de son allumage, cette surconsommation peut être amplement négligée pour la modélisation du navire et / ou le dimensionnement du système hybride.

Diagramme de flux d'énergie

Finalement, des diagrammes de flux d'énergie visibles en Figure 13 peuvent être tracés afin de rendre compte visuellement des consommations relatives des différents « consommateurs » prélevant sur la source « réservoir de carburant ». Sur les deux diagrammes représentés, représentant pour le premier une phase de navigation, et l'autre une phase de pêche (thon), la conclusion fondamentale est que la propulsion représente sans aucune ambiguïté la quasi-intégralité de la consommation énergétique, *a priori* quels que soient ses situations de vie. Il était important de confirmer cela, car ce n'est pas toujours aussi marqué sur certains autres types de navire.

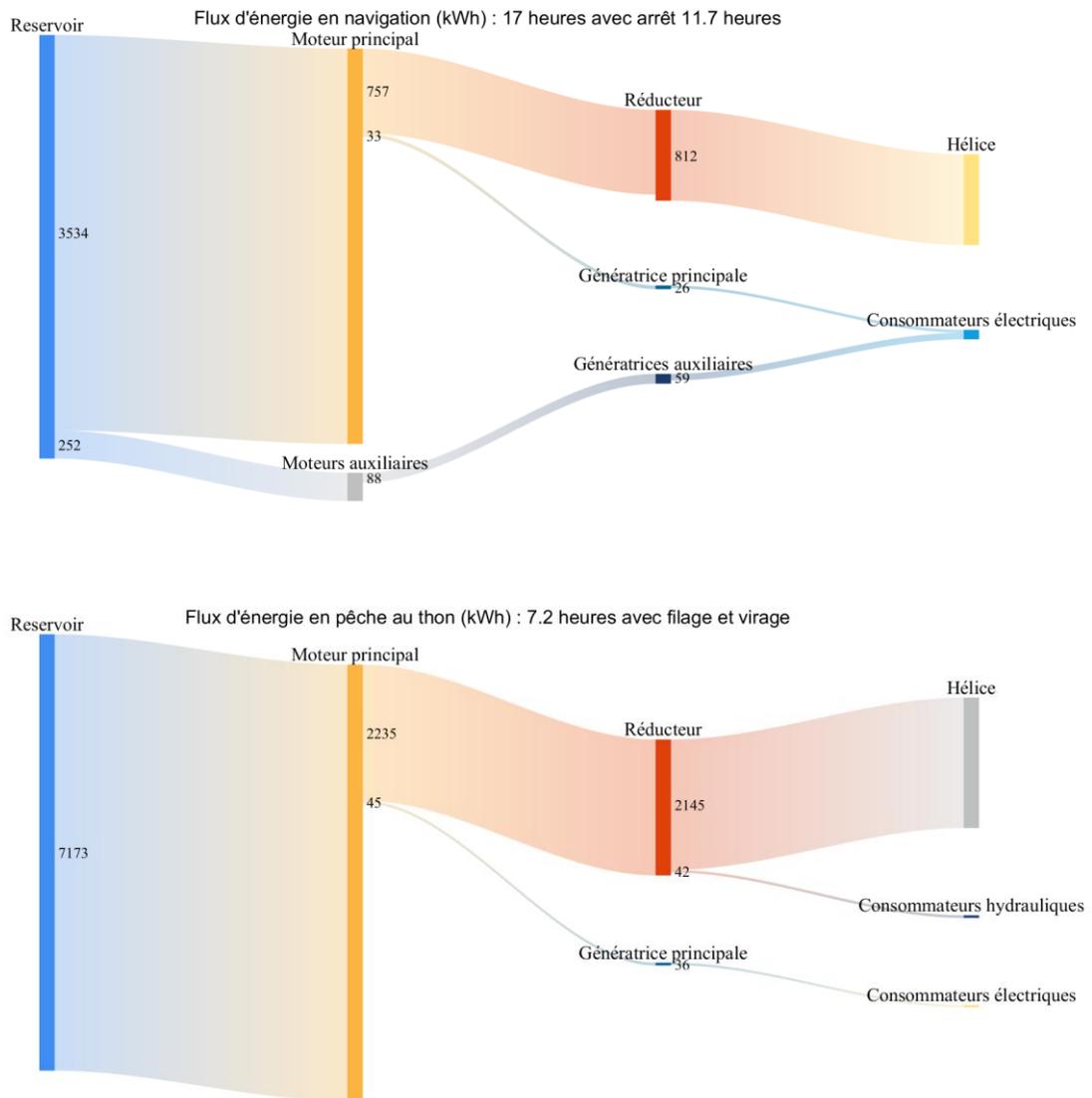


Figure 13. Diagramme de flux d'énergie en navigation

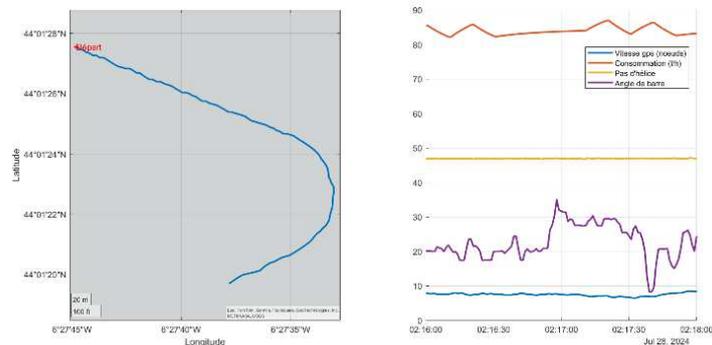
5. Consommations liées au comportement dynamique du navire

Comme expliqué au début du paragraphe précédent, autour des points de fonctionnement nominaux en navigation ou en pêche du navire, différentes causes expliquent la variance des consommations énergétiques du navire par exemple à une vitesse donnée. Tirant parti des mesures à disposition, nous avons donc validé / invalidé certaines hypothèses afin de mieux comprendre les fluctuations de consommation.

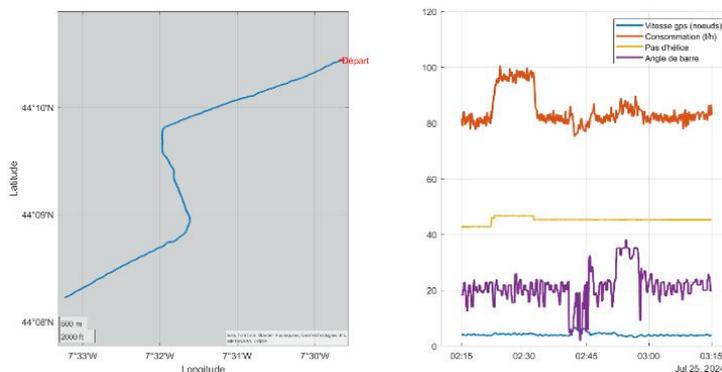
Changement de direction du navire

Au démarrage du projet, l'impact du changement de direction du navire sur la consommation était une hypothèse à étudiée, car dimensionnante pour la construction du modèle du navire (modèle 1D ou 2D). Des trajectoires en phase de navigation, ou en pêche notamment « en bœufs » (deux navires tirant un même chalut) comme celles illustrées en Figure 14 ont été analysées.

En navigation, il n'y a pas de variation de consommation liée à la prise de virage. En pêche en bœufs, de très faibles variations de consommation sont observées. Au regard de ces faibles valeurs, et de la faible occurrence de ces virages « marqués », la conclusion est que la prise de virage n'a pas d'effet significatif sur la consommation énergétique.



(a)



(b)

Figure 14. (a) En navigation - Lors d'un virage à 7.5 noeuds, on n'observe pas de variations de consommation par rapport à la ligne droite. (b) en pêche en bœufs, une variation de +/- 4 l/h est observée. La surconsommation de 12 l/h est due à une accélération, pour gagner momentanément 0.4 noeuds.

Accélération du navire

En régime permanent, *i.e.* à vitesse établie, il est évident que la consommation augmente en fonction de la vitesse, selon la résistance hydrodynamique en « $vitesse^3$ » qui s'exerce sur la coque (*cf.* Figure 7). Cette loi est rappelée en rouge sur la figure du milieu en Figure 15. Cette figure centrale permet d'illustrer les effets de surconsommation mais aussi de sousconsommation en accélération et décélération, *i.e.* lors des variations de vitesse. Ce phénomène inertiel est donc localement non négligeable. Elle explique très certainement en grande partie « l'étalement des tâches » quand on trace la consommation de carburant en fonction de la vitesse surface du navire (*cf.* Figure 7, Figure 9...).

Ce phénomène est modélisé que basiquement par les équations de la physique (modèle déterministe) ; peut-être qu'une approche par des techniques d'apprentissage permettrait d'obtenir un modèle « statistique » plus fin, mais cela demandait un temps non envisageable dans le cadre de cette première phase du projet HYBA.

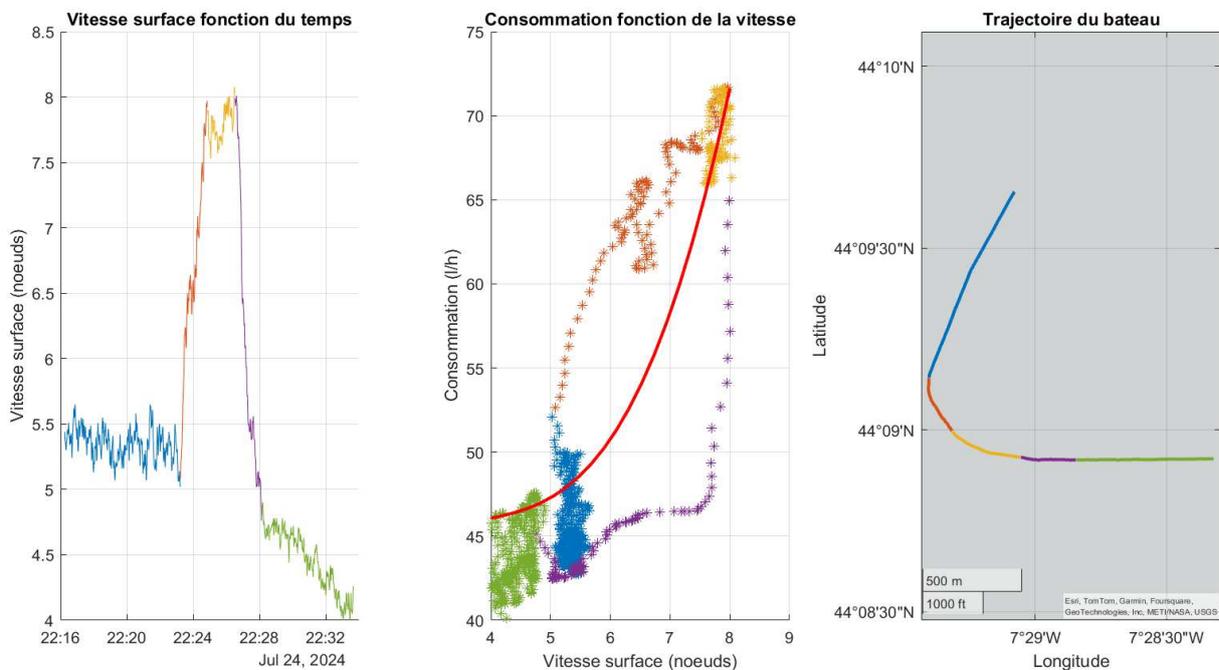


Figure 15. La figure de gauche montre les variations de vitesse surface en fonction du temps. La figure centrale montre la surconsommation lors de l'accélération et la sousconsommation lors de la décélération. La figure de droite montre la trajectoire du navire durant cette manœuvre.

Impact de « l'état de mer »

L'état de la mer est mesurée sur une échelle de 0 à 9 appelée échelle de Douglas. Chaque état est caractérisé par la hauteur des vagues. Il est certain que l'état de mer a un impact sur la consommation du navire ; cf. Figure 17 par exemple.

Le souci est que l'état de mer n'est pas mesurable directement, et ne pas être enregistré systématiquement par les marins, même si pour ce projet des relevés manuels (utiles !) ont été réalisés. Notre objectif est pourtant de comprendre la relation entre l'état de mer et la consommation du navire, pour analyser les données mais aussi reproduire ce phénomène dans le modèle simulateur du Naoned. Il faut donc être capable d'établir un modèle de celui-ci.

A titre d'exemple, la navigation du 21 novembre est qualifiée de "gros mauvais temps" par les marins. Ils estiment que l'état de mer à ce moment-là était de 8 sur une échelle de 0 à 9. Ce sont des conditions très rarement rencontrées mais qui permettent de calibrer un premier modèle d'état de la mer, ou plus précisément de calibrer une estimation de l'état de mer dont on observe l'effet indirectement sur une mesure odométrique du navire, ici son roulis. La Figure 16 montre un modèle basique, une simple corrélation entre l'amplitude de l'angle de roulis (calculée sur 10 secondes) et l'état de la mer, estimée par les marins.

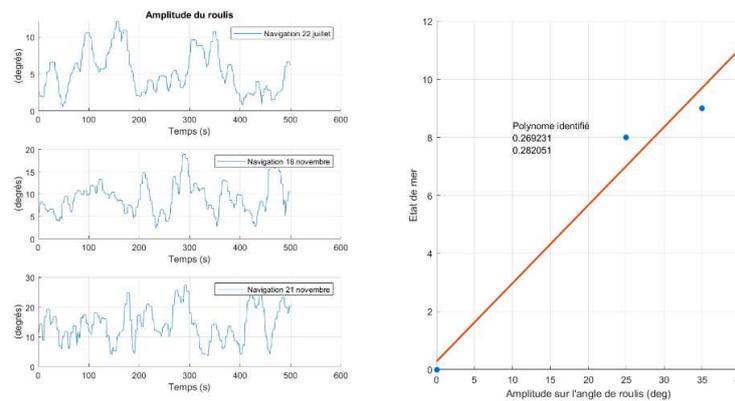


Figure 16. Construction d'un modèle basique de l'état de mer en fonction de l'amplitude de l'angle de roulis.

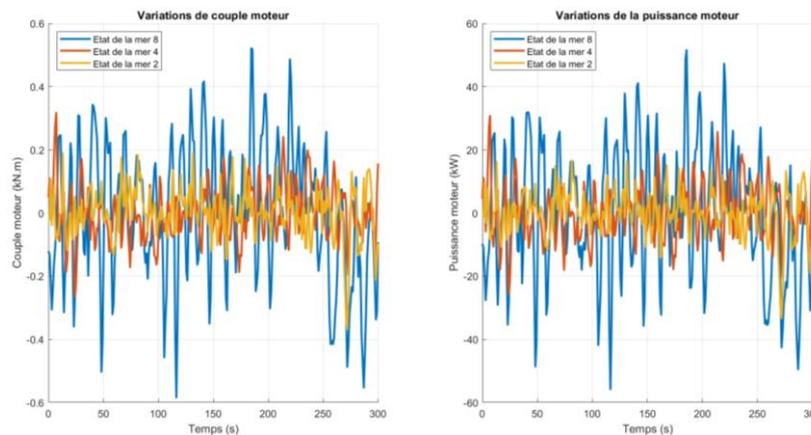


Figure 17. Variations de couple et de puissance moteur pour trois états de mer différents.

Pour ce phénomène physique, comme pour l'analyse de l'effet des accélérations et décélérations sur la consommation, deux approches peuvent être envisagées pour 1/ analyser l'impact de la houle sur la consommation du navire, 2/ établir un modèle de cette relation ; une approche déterministe basée sur l'analyse des courbes et l'exploitation de modèle physique connu *a priori*, une approche plus « statistique » faisant appel aux outils du machine learning.

Les deux approches ont été utilisées de manière complémentaire. Dans un premier temps, une analyse de mesures expérimentales bien ciblées comme visibles sur la Figure 17 a permis de caractériser l'impact de l'état de mer sur les variables de couple et de puissance moteur. Ceci s'avère dimensionnant pour le choix du moteur électrique (et du pack batterie), car on peut espérer « lisser » ces variations de puissance à l'aide du moteur électrique, plus apte à rejeter ses sollicitations que le moteur thermique – on parle de “peak shaving”. Ensuite, une analyse de Fourier a permis d'étudier la fréquence des vagues en fonction de l'état de mer (et certainement de la vitesse surface du navire) ; cf. Figure 18.

Le couple moteur, calculé avec le modèle d'hélice, varie dans une gamme de ± 550 N.m (soit ± 50 kW) pour le cas d'un état de la mer 8. Pour des états de la mer 4 et 2, les variations sont de l'ordre de ± 290 N.m (± 25 kW) et ± 150 N.m (± 15 kW) respectivement. Les contenus fréquentiels sont légèrement différents pour les trois conditions de houle mais les fréquences les plus représentées sont situées autour de 0.08Hz. Ces informations ont été utiles pour le prédimensionnement du moteur électrique.

Pour le développement du modèle de simulation, une modélisation assez macroscopique déterministe a été retenue à ce stade. L'idée est la suivante ; la consommation des moteurs (thermiques et électriques) n'est connue que pour des régimes statiques (vitesse de rotation du moteur constant). Pour estimer la surconsommation en phase dynamique, un coefficient de surconsommation de 20% pour un état de mer de 9 et une relation linéaire pour les autres états de mer a été retenu.

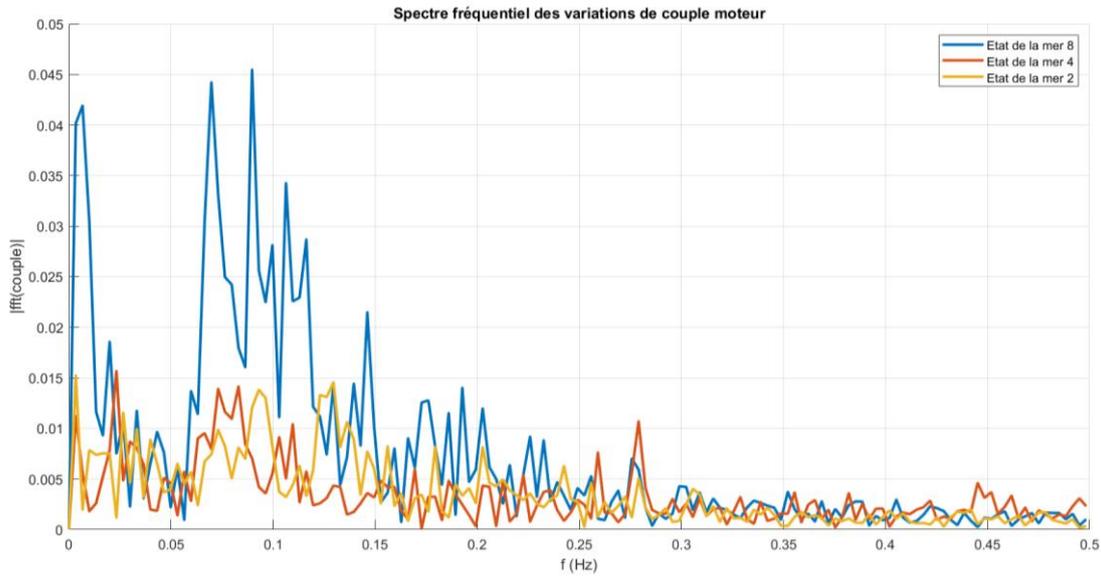


Figure 18. Spectre en fréquence du couple moteur lors de trois essais avec des conditions de houle différentes

La seconde approche basée data et machine learning a consisté à apprendre un modèle statistique qui pourrait se résumer à l'équation suivante ;

$$consommation(t) = f(vitesse\ navire(t), \text{état de mer}(t), \text{présence chalut}(t)).$$

S'il est certain que cette approche est prometteuse, le peu de temps pour l'ajuster, et surtout la non-homogénéité des données comme illustré sur la Figure 19 empêche une bonne précision du modèle, pour certaines combinaisons des signaux d'entrées (vitesse navire, état de mer).

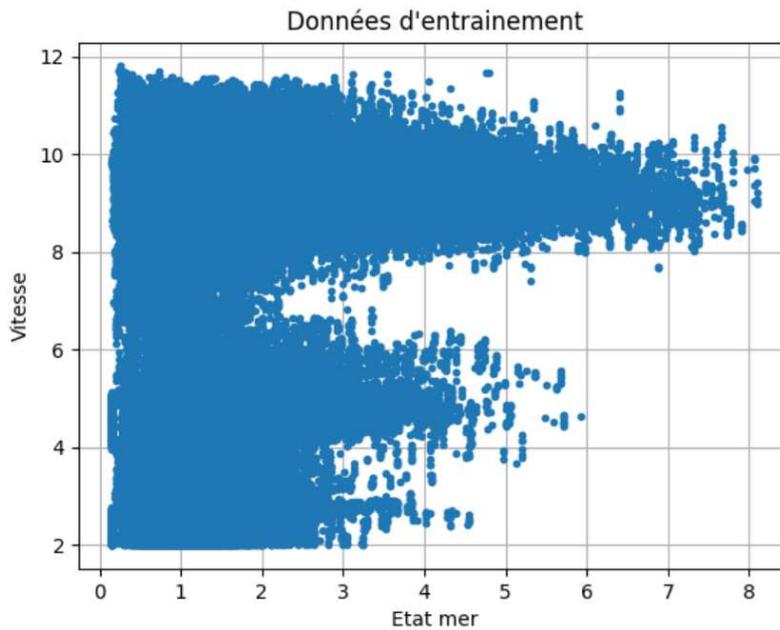


Figure 19. Cartographie des données d'entrée disponible pour l'entraînement du modèle ; on voit que les informations pour les états de mer important et les faibles vitesses notamment sont pauvres.

e. Conclusions

Il est certain que toutes les données collectées sur le navire durant presque un an ont permis d'atteindre nos objectifs qui étaient de comprendre les flux énergétiques à bord du Naoned. Cela nous a permis d'extraire tout d'abord les informations macroscopiques suivantes, pour l'analyse des données puis la construction d'un modèle énergétique parcimonieux du bateau:

- On peut « résumer » à un coût d'approximation raisonnable la vie d'un chalutier à la succession, selon des durées types assez facilement identifiables, de certaines phases de fonctionnement bien délimitées : navigation moyenne et haute vitesse, phases de pêche, de manœuvre (filage / virage), avec pour chacune des consommations types bien établies.
- Il n'est absolument pas nécessaire de prendre en considération la dynamique latérale du navire, et que résumer sa dynamique longitudinale par des points de fonctionnement statiques (à des vitesses établies) est certes approximatif, mais tolérable dans un premier temps.
- Les seuls consommateurs annexes impactants sont les actionneurs hydrauliques utilisés pour la manœuvre des chaluts ; impactants non pas sur la consommation totale du navire sur une mission de pêche, mais sur d'éventuels pics de consommation qu'il pourrait être bon de lisser par l'utilisation d'une source d'énergie électrique.
- La houle est un phénomène qui mériterait d'être mieux analysé, afin de le prendre en considération idem peut-être pas tant sur la consommation totale d'une mission de pêche, mais pour étudier l'intérêt d'une propulsion hybride en termes de performance dynamique du navire (manœuvrabilité et performance en situation de pêche par exemple, tout en restant modéré sur la consommation de carburant).

f. Perspectives

Valorisation des datas : Les perspectives, simplement sur ces aspects « données », sont déjà nombreuses. Tout d’abord, la base de données ainsi collectée est précieuse, par le fait qu’elle adresse un navire réellement en exploitation d’une part, et d’autre part parce que le nombre de capteurs est précieux. Comme mentionné dans l’article scientifique de survey [MBST25]¹, les expérimentations sur navires réellement en exploitation sont rares. Etant donné le temps consacré à l’analyse des données (moins de 6 mois), de même pour la modélisation, et les compétences disponibles au sein du consortium, les outils mathématiques employés ont été plutôt simples, permettant toutefois d’aboutir à des conclusions certainement pertinentes et exploitables à très court terme. Mais il est certain que cette base d’information est précieuse, et qu’une valorisation par des approches statistiques et datas, couplées aux modélisations physiques est nécessaire.

Modélisation de l’impact de la houle sur la consommation : il s’agit d’un cas particulier en lien direct avec les propos précédents. Concrètement, il nous semble nécessaire de développer un ou des modèles permettant d’une part d’être en mesure d’estimer l’état de mer – par définition non mesurable directement – à travers des mesures disponibles sur le navire (centrale inertielle, vitesse longitudinale...), et d’autre part, d’être capable de reconstruire l’effet dynamique de la houle sur la coque du navire, afin de simuler son impact sur la consommation de carburant. De notre point de vue ceci est un sujet de recherche ouvert, nécessitant des développements académiques conséquents, à cheval entre la modélisation multi-physique et les approches datas. De plus, même si les données collectées sont déjà nombreuses, il n’est pas certain qu’elles soient assez riches à l’heure actuelle pour permettre l’entraînement d’un modèle dans une approche dite « supervisée » ; analyser les données déjà disponibles mais non traitées, voire relancer des campagnes de mesure plus spécifiques (par exemple à basse vitesse pour des états de mer important) seraient potentiellement nécessaires, même si la mise en œuvre pratique n’est peut-être pas envisageable.

¹ S. Ma'arif, M.A. Budiyo, Sunaryo, G. Theotokatos, Progress in hybrid and electric propulsion technologies for fishing vessels: An extensive review and prospects, Ocean Engineering, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120017>.

10. WP-C - modélisation énergétique du navire Naoned

1. Modèle énergétique M1 : dans sa configuration 100% diesel actuel

Ce paragraphe constitue le livrable L.C.7.2 : Modèle énergétique numérique « M1 » du chalutier et documentation associée

a. Objectif

L'objectif ici était de réaliser un modèle, de précision juste nécessaire, permettant de reproduire le comportement énergétique du Naoned constaté lors de l'analyse des données (cf. section 2). La motivation est la suivante ; si on est capable de mettre en place ce « jumeau numérique » calibré sur les données expérimentales à notre disposition, permettant d'estimer les consommations instantanées et totales pour des missions de pêche bien définies, alors il pourra servir de base pour un modèle « M2 » intégrant une propulsion hybride, et des gains de consommation pourront être ainsi estimés.

b. Méthodologie

L'analyse menée en amont sur les datas a permis de poser et valider plusieurs hypothèses fixant le niveau de précision du modèle. Ainsi, les grandes hypothèses faites sont :

- Un modèle dit « 1 dimension », *i.e.* ne prenant en considération que la dynamique longitudinale du navire s'avère suffisant.
- Les simulations pourront se focaliser sur des profils de mission-type, combinatoire de points de fonctionnement nominaux identifiés dans le Tableau 1.
- Les données à disposition sont assez conséquentes pour être capable « d'identifier » des modèles de chaque organe constitutif du navire, *i.e.* être capable de retrouver la valeur de leurs paramètres caractéristiques, non disponible dans d'éventuels documentations.

Concrètement, une architecture du modèle a été définie permettant de « relier » les différents organes du navire. Ensuite, des modèles « juste nécessaires » facile à identifier et simuler ont été mis en équation. Les paramètres de ces équations ont été renseignés, parfois (rarement...) à l'aide d'informations disponibles *a priori*, le plus souvent retrouvés à l'aide de différentes techniques d'optimisation et identification.

c. Architecture générale du modèle du navire

L'architecture du modèle du navire peut être résumée par la Figure 20. Finalement ce schéma générale sera le même pour le modèle du Naoned dans sa version actuelle avec une propulsion 100% Diesel – Modèle M1, et la propulsion hybride parallèle – Modèle M2. La différence entre les deux modèles étant le contenu du bloc « Powertrain » (chaîne de propulsion). Ce modèle respecte une logique de modélisation « effort – flux » standard dans la modélisation multi-

physique ; par exemple pour les parties mécaniques en translation, les forces ou poussées constituent les efforts, la vitesse le flux, et en rotation les couples sont les efforts, la vitesse de rotation angulaire le flux.

Les signaux mis en jeu sont résumés dans le Tableau 4. Notons que le « speed pilot » représente le régulateur de vitesse ou l’humain en charge du suivi de la consigne de vitesse $dn_m(t)$. Le bloc « EMC » représente le « Energy Management Controller », qui en fonction du « mode » qu’il reçoit et de la nature du « Powertrain » va mettre en œuvre différents algorithmes de pilotage du powertrain en cherchant potentiellement à minimiser la consommation de Diesel. L’intégrateur n’a rien de physique mais est un détail « technique » fondamental en simulation, il permet de cadencer les calculs des équations dynamiques, tout au long d’une durée de temps « duration » (s), en respectant un pas de temps de calcul – dit pas d’échantillonnage dt (s), et permettant concrètement d’intégrer l’accélération du navire $\dot{u}(t)$ en la vitesse $u(t)$. Le « powertrain » pour le modèle M1 du Naoned dans sa version actuelle est représentée par la Figure 21 ; les variables mises en jeu sont aussi disponibles dans le Tableau 4.

Tableau 4. Définition des signaux du modèle commun aux modèles M1 et M2.

signal	définition	signal	définition
$u(t)$	Vitesse du navire (m/s)	$dn_m(t)$	Vitesse de rotation du moteur thermique désirée (tr/min)
$\dot{u}(t)$	Accélération du navire (m/s ²)	$dT_h(t)$	Poussée de l’hélice désirée (N)
$du(t)$	Vitesse désirée du navire (m/s),	$mode(t)$	Mode de fonctionnement de l’EMC.
$pas(t)$	Pas imposé à l’hélice (m)	$conso(t)$	Conso. instantanée du moteur thermique (l/h)
$n_h(t)$	Vitesse de rotation de l’hélice (tr/min)	T_{hmax}	Poussée max de l’hélice – sécurité (N)
$T_h(t)$	Poussée produite par l’hélice (N)	$T_c(t)$	Effort de traction du chalut (N)
$Q_h(t)$	Couple résistant par l’hélice (N.m)	$gear_active(t)$	Mise à l’eau ou pas du chalut (0 ou 1)
Powertrain modèle M1			
$Q_m(t)$	Couple en sortie d’arbre moteur thermique (N.m)	$n_m(t)$	Vitesse de rotation du moteur thermique (tr/min)
Powertrain modèle M2			
$Q_{me}(t)$	Couple en sortie d’arbre moteur électrique (N.m)	$n_{me}(t)$	Vitesse de rotation du moteur électrique (tr/min)
$dn_{me}(t)$	Vitesse de rotation du moteur électrique désirée (tr/min)	$SOC(t)$	Etat de charge de la batterie (%)
$P_b(t)$	puissance (algébrique) en entrée de la batterie (W)		

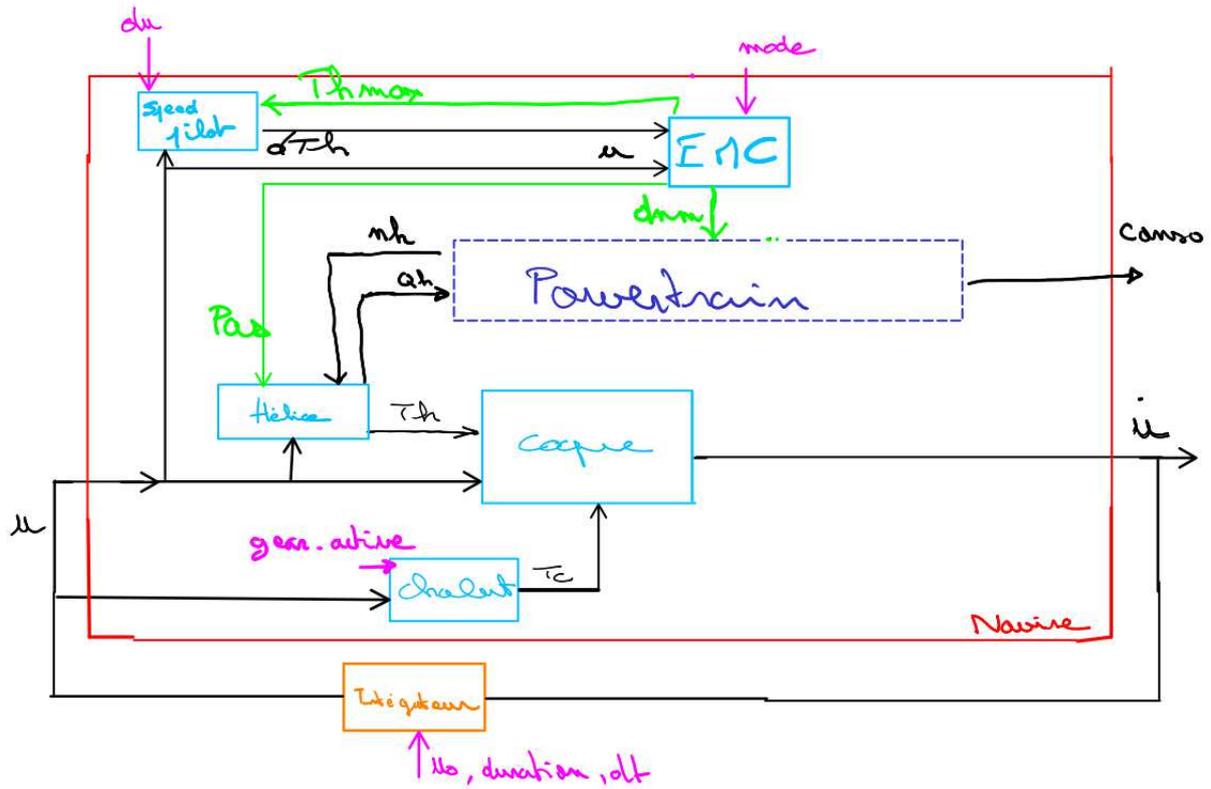


Figure 20. Architecture générale des modèles du Naoned - M1 (Diesel) ou M2 (Hybride)

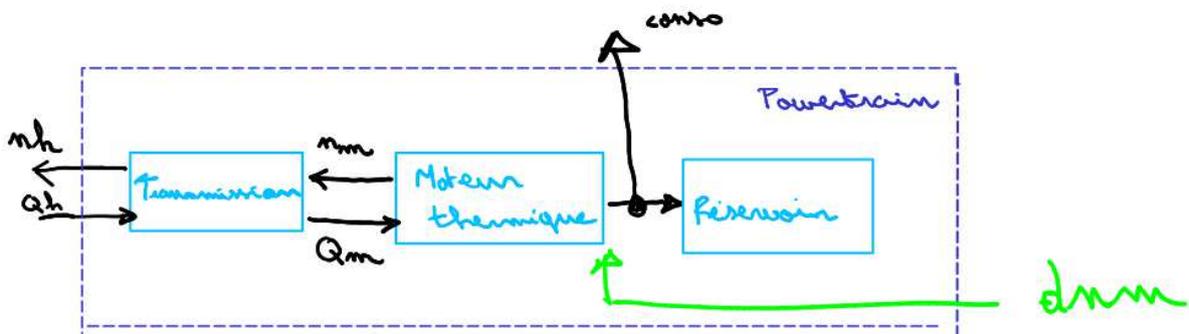


Figure 21. Modèle M1 - le powertrain repose sur le seul moteur thermique.

L'architecture des modèles, notamment du M1 étant défini, nous pouvons présenter la mise en équation de chacun des blocs.

d. Modélisation des organes

1. Modélisation de la coque

La modélisation dynamique (inertielle) de la coque choisie pour sa simplicité peut être résumé par la Figure 22. Selon l'axe longitudinale du navire, on applique le Théorème Fondamentale de la Dynamique, pour obtenir l'équation suivant

$$T_h(pas(t), u(t)) - R_t(u(t)) - T_c(u(t)) = (m + m_A)\dot{u}(t)$$

avec $R_t(t)$ la résistance à l'avancement dû aux effets hydrodynamiques de l'eau sur la coque, et m_A la « masse ajoutée » qui représente la masse d'eau déplacée par la coque augmentant l'inertie du navire. Les définitions des termes $R_t(t)$ et m_A répondent à différentes formulations plus ou moins précises, comme on peut le voir par exemple dans le livre de référence de ²Fossen.

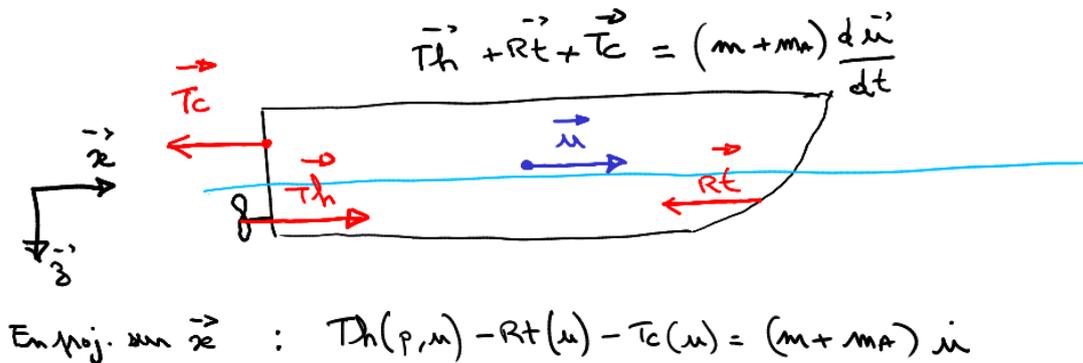


Figure 22. Modèle dynamique 1D de la coque

Pour la résistance à l'avancement $R_t(t)$, on utilise le modèle semi-empirique classique appelé modèle de Holtrop-Mennen³, qui consiste en un polynôme d'ordre 4 en la vitesse d'avance du navire $u(t)$. Différents outils de calcul ont été explorés (par exemple PolyCad[®]) pour estimer les coefficients du polynôme sur la base de la géométrie de la coque, et le modèle fourni par Coprexma (cf. Figure 23) a été retenu. Il est courant de devoir appliquer un coefficient multiplicateur correctif sur cette formule afin de « recaler le modèle ». Ayant obtenu le modèle de l'hélice (cf. description à suivre), fonction du pas imposé par le pilote, le régime du moteur thermique (connu car fixé), et la vitesse d'avance du navire, on peut estimer sa poussée $T_h(t)$ en supposant être à vitesse constante, on a $\dot{u}(t) = 0$, et donc $R_t(t) = T_h(t)$. CFigure 23², ce qui a permis d'identifier le gain correctif à 1.5.

² Fossen, T. I. (2021). [Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control](#), 2nd edition, John Wiley & Sons. Ltd., Chichester, UK. ISBN 978-1119575054.

³ Holtrop J, Mennen GGJ, "An approximate power prediction method". *International Shipbuilding Progress*.29(335):166-170, 1982. doi:[10.3233/ISP-1982-2933501](https://doi.org/10.3233/ISP-1982-2933501)

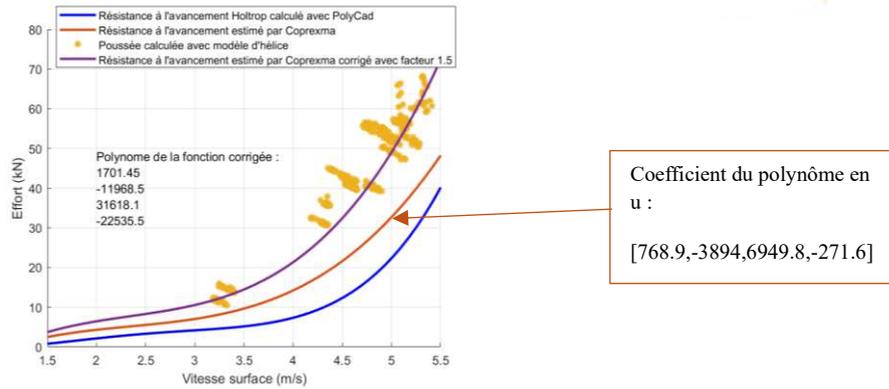


Figure 23. Courbe de résistance à l'avancement $R_t(t)$, modèle de Holtrop - Mennen

Pour la masse ajoutée, une formule semi-empirique simple peut être trouvée dans la littérature, notamment dans l'article [TNAD20]⁴

$$m_A = \frac{\pi \rho T^2 B}{2} C_M$$

avec T , B , C_M des caractéristiques géométriques de la coque, disponible grâce au plan fourni par la Coprexma. On trouve ainsi une valeur de masse ajoutée de 123 434kg.

Afin de valider ce résultat, une identification expérimentale a aussi été réalisée (cf. Figure 24) ; sans rentrer dans les détails, étant capable de mesurer l'accélération (et la décélération) $\dot{u}(t)$ du navire à tout instant grâce à la centrale inertielle, est étant capable d'estimer les efforts à la coque - en l'absence de chalut à l'eau, la poussée de l'hélice $T_h(t)$ est connue grâce au modèle de l'hélice (définie plus loin), on peut retrouver le terme $(m+m_A)$ représenté la pente de la courbe visible sur la Figure 24. La méthode est approximative car la dynamique de décélération est quelque peu différente de celle d'accélération, mais cette méthode permet d'obtenir une masse ajoutée d'environ 100 000kg, ce qui permet de valider l'ordre de grandeur trouvé par la formule précédemment citée.

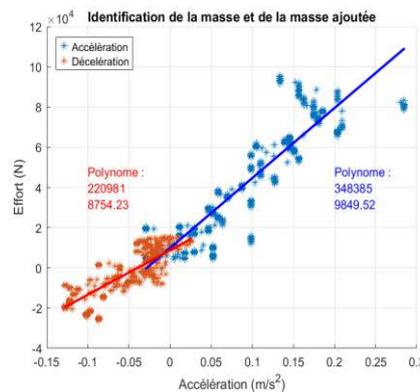


Figure 24. Identification de la masse et de la masse ajoutée par les mesures expérimentales.

⁴S. Tavakoli, S.Najafi, E. Amini, and A. Dashtimansh, "Ship acceleration motion under the action of a propulsion system : A combined empirical method for simulation and optimization". *Journal of Marine Engineering & Technology*, 20(3), 200–215, 2020. <https://doi.org/10.1080/20464177.2020.1827490>.

2. Paramètres principaux

Tableau 5. Tableau de valeur pour certains paramètres et signaux dimensionnants de chaque organe

paramètres	définition	signal	définition
Modèle de la coque			
m = 250 000	Masse du navire (kg)	$m_A = 123\,434$	Masse ajoutée (kg)
$w_h = 0.182$	Coefficient de sillage	$t_h = 0.214$	Coefficient de succion
Modèle de l'hélice			
K_T	Coefficients de poussée (sans dim.)	K_Q	Coefficients de couple (sans dim.)
D	Diamètre de l'hélice (m)	ρ	masse volumique de l'eau (kg.m^{-3}),
$V_a(t)$	Vitesse du fluide qui traverse le disque de l'hélice (m.s^{-1})	$P/D(t)$	Pas de l'hélice normalisé par son diamètre (sans dim.)
$J(t)$	Vitesse ou nombre d'avance normalisée		
Modèle du moteur thermique			
$\eta_m(t)$	Rendement en puissance	$n_{m_nom} = 750$	Vitesse de rotation nominale du moteur ABV (tr/min)
$\eta_{m_nom} = 0.4$	Rendement maximal		
Modèle de transmission			
$R = 1/2.953$	Rapport de réduction (moteur diesel seul)	$\eta_r = 0.96$	Rendement total réduction et ligne d'arbre
R_m	Rapport de réduction moteur thermique (hybride)	R_{me}	Rapport de réduction moteur électrique (hybride)
$P_p(t)=60\text{kW}$ (filage), 180 kW (virage)	Puissance des pompes hydrauliques (W)	$P_e(t)=5\text{kW}$	Puissance alternateurs principales (W)
$\eta_p = 0.5$	Rendement de la courroie d'entraînement de l'alternateur		
Speed Pilot			
$k_p=3500$	Gain proportionnel du PID	$k_d = 0$	Gain dérivé du PID
$k_i=700$	Gain intégral du PID		
Modèle du moteur électrique			
$\eta_{me}(t)$	Rendement en puissance		
Modèle de la batterie			
$Q_b(t)$	Charge de la batterie	Q_{b_max}	Capacité maximale [kWh]
$SOC(t)$	Etat de charge de la batterie (%)	U_b	Tension nominale aux bornes de la batterie
$\eta_b = 1$	Rendement de la batterie		

3. Modélisation de l'hélice

On trouve principalement dans la littérature académique et industrielle deux modèles d'hélice, tous les deux basés sur des cartographiques – nous avons donc des modèles purement statiques – permettant d'exprimer T_h la poussée générée par l'hélice, son couple résistant (*i.e.* vu par le moteur entraînant l'hélice) Q_h , et son rendement h_h en puissance. On peut passer d'un modèle à l'autre aisément à l'aide de formule de conversion linéaire. L'ouvrage de référence sur le sujet est le livre de Carlton [Car07]⁵.

Concrètement, nous avons retenu le modèle que l'on notera M_K ou modèle de Wageningen faisant appel à deux coefficients fondamentaux notés classiquement K_T et K_Q . Ce modèle constitue finalement une norme, respectée par les constructeurs d'hélice, qui suivent la paramétrisation définie par ces deux coefficients pour établir la géométrie de l'hélice ; on parle d'hélice appartenant à la « b-series », la référence [Oos70]⁶ présentant par exemple tous les coefficients pour ces hélices, potentiellement avec présence de tuyère, comme sur le Naoned. Le logiciel Marin[®] utilisé par la société Masson expert hélice sur le projet HYBA exploite ainsi exactement la même base de données.

Le modèle M_K s'exprime ainsi :

$$\begin{cases} T_h(t) = K_T \rho D^4 n h(t) |n h(t)| \\ Q_h(t) = K_Q \rho D^4 n h(t) |n h(t)| \end{cases}$$

Les signaux sont définis dans le Tableau 4, les paramètres dans le Tableau 5. Les coefficients K_T et K_Q pour une hélice donnée sont obtenus avec des essais en eau libre (loin de tout obstacle) ou en tunnel de cavitation. On détermine expérimentalement des points de mesure reliant ces coefficients au nombre d'avance :

$$J(t) = \frac{V_a(t)}{\eta_h(t) D}$$

La Figure 25 montre un exemple de ces coefficients en fonction de J . Sur les graphiques de caractéristiques, on ajoute aussi le rendement de l'hélice noté η_h , défini comme le rapport de sa puissance de sortie, transférée au fluide, et de la puissance mécanique de rotation absorbée :

$$\eta_h(t) = \frac{V_a T_h(t)}{2\pi n_h(t) Q_h(t)} = \frac{J(t) K_T}{2\pi K_Q}$$

L'allure de ces courbes est la même quelle que soit l'hélice.

⁵ J.S. Carlton. [Marine Propellers and Propulsion](#). (2007). Elsevier Ltd., second edition.

⁶ M.W. Oosterveld, « [Wake adapted propellers](#) », these de doctorat de Mechanical, Maritime and Materials Engineering Faculty, 1970.

Modèle pour hélice à pas variable

Les coefficients K_T et K_Q sont tracés en fonction de J seulement. Dans le cas d'une hélice à pas variable $pas(t)$, ce qui est le cas pour le Naoned, il faut intégrer cette variable au modèle. Le principe est définie notamment dans la thèse [Smo06]⁷. Pour un modèle d'hélice tout à fait général, il faut également introduire des informations d'aire, d'aire projetée et de nombre de pales. Le modèle complet pour ces coefficients est finalement un polynôme de plusieurs variables que nous détaillerons pas ici, mais qui permet finalement d'exprimer les coefficients K_T et K_Q et le rendement η_h en fonction de J , mais aussi du pas de l'hélice $pas(t)$;

$$K_t(pas(t), J(t)) \quad K_q(pas(t), J(t)) \quad \eta_h(pas(t), J(t)).$$

La Figure 26 montre graphiquement l'effet de la paramétrisation en fonction du pas, en général normalisé par le diamètre de l'hélice, variable intermédiaire que l'on note P/D .

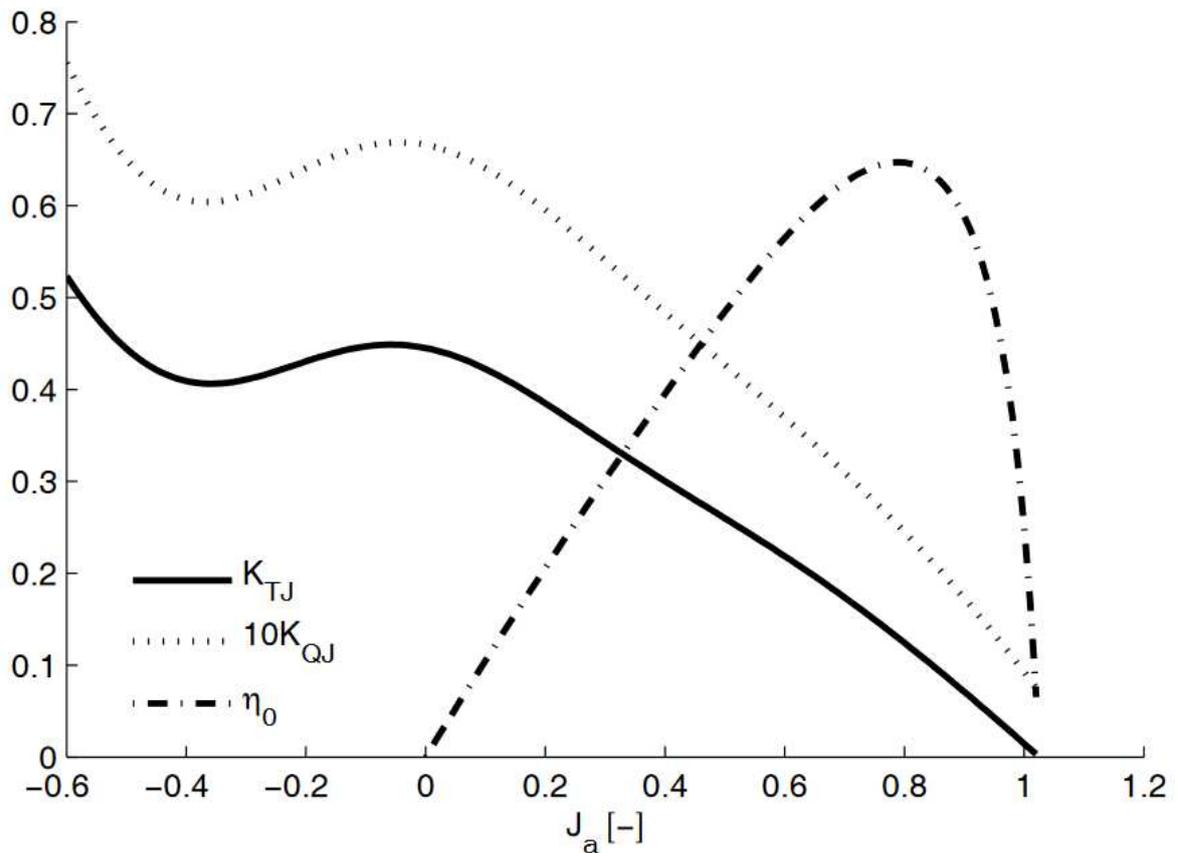


Figure 25. Exemple de coefficients K_T , K_Q , et η_h pour une hélice donnée, à un pas fixé.

⁷ O.N. Smogeli, "Control of Marine Propellers: from normal to extreme conditions", Thèse de Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science & Technology, 2006.

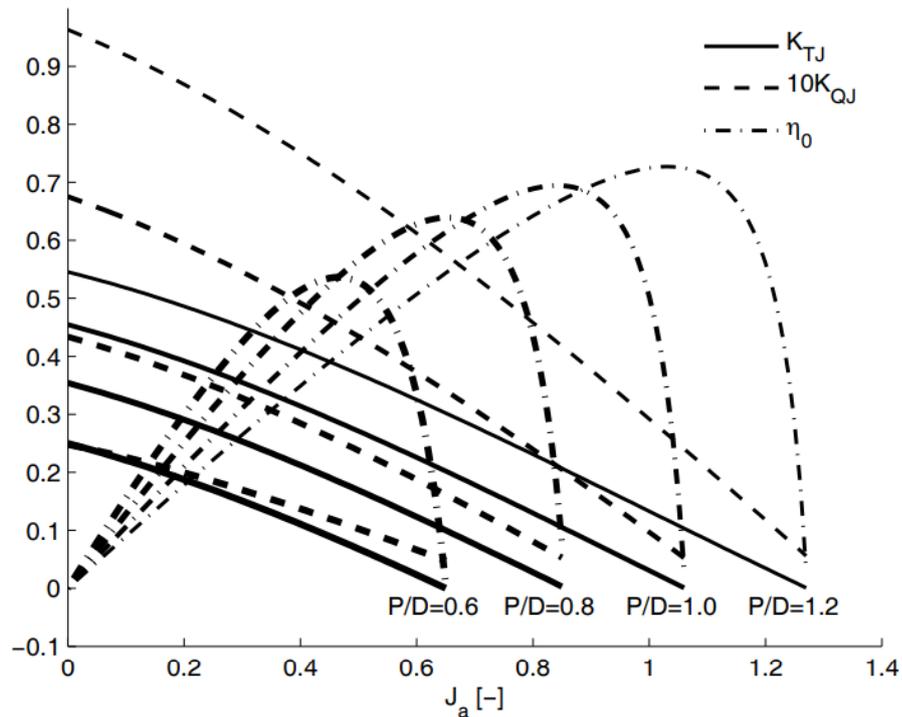


Figure 26. Exemple de coefficients K_T , K_Q , et η_h pour une hélice donnée, à pas variable.

Prise en compte des effets hydrodynamique de la coque

Pour prendre en compte l'effet de la coque qui perturbe le fonctionnement idéal de l'hélice, il faut corriger ces modèles initiaux dont la validité se limite à l'hélice en eau libre. La prise en compte de l'effet de la coque est réalisée à travers une série de coefficients qui pondèrent la poussée déterminée en eau libre. Premièrement, la vitesse du fluide au niveau du disque d'hélice V_a est différente de la vitesse du bateau par rapport au courant ;

$$V_a(t) = (1 - w_h)u(t)$$

avec $u(t)$ la vitesse longitudinale du bateau et w_h le coefficient de sillage. La littérature fournit des méthodes pour identifier ce coefficient de sillage expérimentalement, des ordres de grandeur, voir des modèles variant dans le temps en fonction des mouvements du bateau. Nous avons retenu une valeur en croisant les informations issues des experts coque et hélice du consortium, et par une technique de recalage du modèle en superposant les vitesses du bateau pour des pas d'hélice donnés, obtenues en simulation et mesurées expérimentalement. Ensuite, l'action de l'hélice sur l'eau produit une dépression à l'arrière de la coque (la suction). Cela se traduit par une perte de poussée encodée dans le coefficient t_h :

$$T_h(t) = (1 - t_h)T_a(t)$$

$T_h(t)$ représente en fait la poussée réellement produite par l'hélice, et $T_a(t)$ celle issue de la cartographie de l'hélice. Le coefficient t_h a été pris constant quel que soit le modèle d'hélice retenu, en suivant la même démarche que pour le coefficient de sillage (cf. valeurs Tableau 5).

Finalement, nous aboutissons à une modélisation pour une hélice à pas variable respectant la nomenclature « b-series / Wageningen » via 3 cartographies paramétrées par le pas d'hélice « normalisé » P/D et la vitesse d'avance normalisée, $J(t)$ plus les deux coefficients correctifs w_h et t_h .

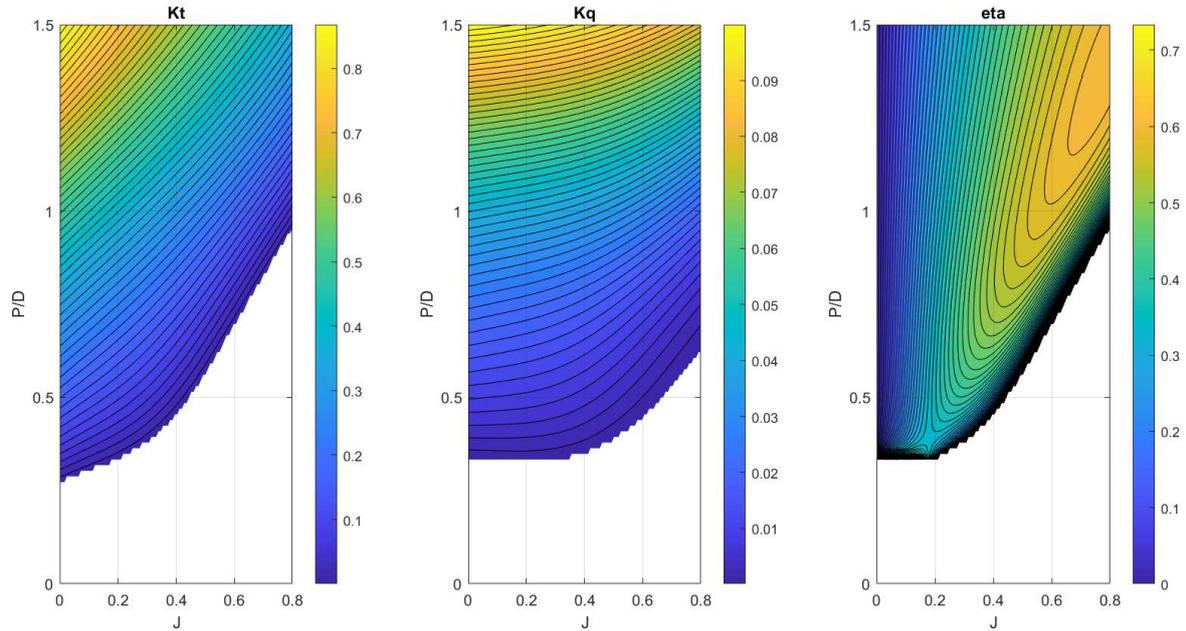


Figure 27. Cartographie type définissant intégralement une hélice à pas variable – courbe de l'hélice Ka 4-55 équipant le Naoned.

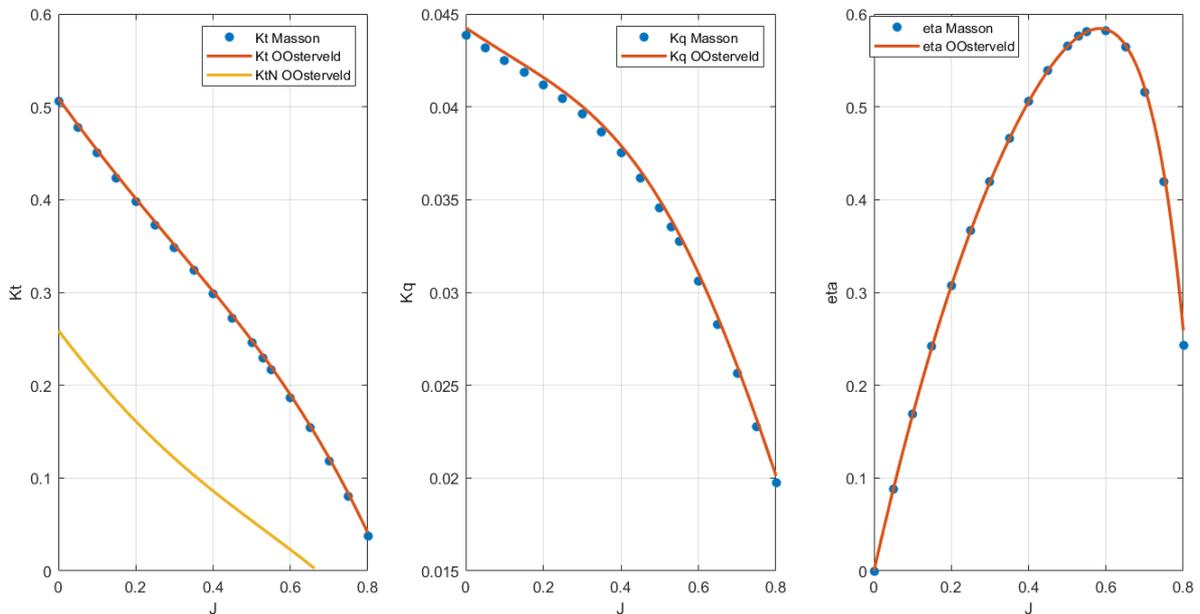


Figure 28. Modèle d'hélice KA 4-55 sous tuyère 19A. Comparaison des données fournies par Masson et des courbes déterminées à partir des coefficients issues de [0os70].

Hélice du Naoned

Les informations sur l'hélice actuelle du Naoned nous ont été fournies par Masson :

- hélice calculée d'après les courbes Wageningen type Ka 4-55 sous tuyère 19A,
- 4 pales,
- D diamètre 2070mm,
- hélice dimensionnée pour la navigation à 11 noeuds et coef de sillage estimé à 18%.

Masson nous a aussi fourni les courbes des caractéristiques de cette hélice, pour une valeur de P/D de 0.995. Ces données sont issues du logiciel MARIN. Nous avons dû comparer ces données avec celles que l'on obtient avec notre propre modèle général basé sur la référence fondamentale [0os70] ; on voit sur la Figure 28 que les deux modèles collent parfaitement. Cette validation était nécessaire, car par la suite pour le dimensionnement de la propulsion hybride, nous devons peut-être aussi étudier le changement du modèle d'hélice, et il faut que leurs représentations soient calibrées.

Nous montrerons par la suite dans la modélisation du moteur thermique des courbes qui montre aussi la bonne cohérence du modèle d'hélice avec les données expérimentales, notamment avec des « essais au point fixe ».

4. Modélisation du moteur thermique

Les moteurs thermiques se représentent classiquement aussi par des cartographies, prenant en entrée la vitesse de rotation du moteur $n_m(t)$ et le couple moteur fourni $Q_m(t)$ et donnant en sortie un rendement en puissance $\eta_m(t)$ (sans unité) ou une *consommation spécifique* en (g/kWh). Le modèle peut donc s'écrire macroscopiquement

$$\eta_m(t) = f_m(n_m(t), Q_m(t)).$$

Un exemple de cartographie, issue d'un moteur Mitsubishi® S652-T2MPTK candidat au remplacement du moteur de marque ABC® est proposée à titre d'illustration sur la Figure 29.

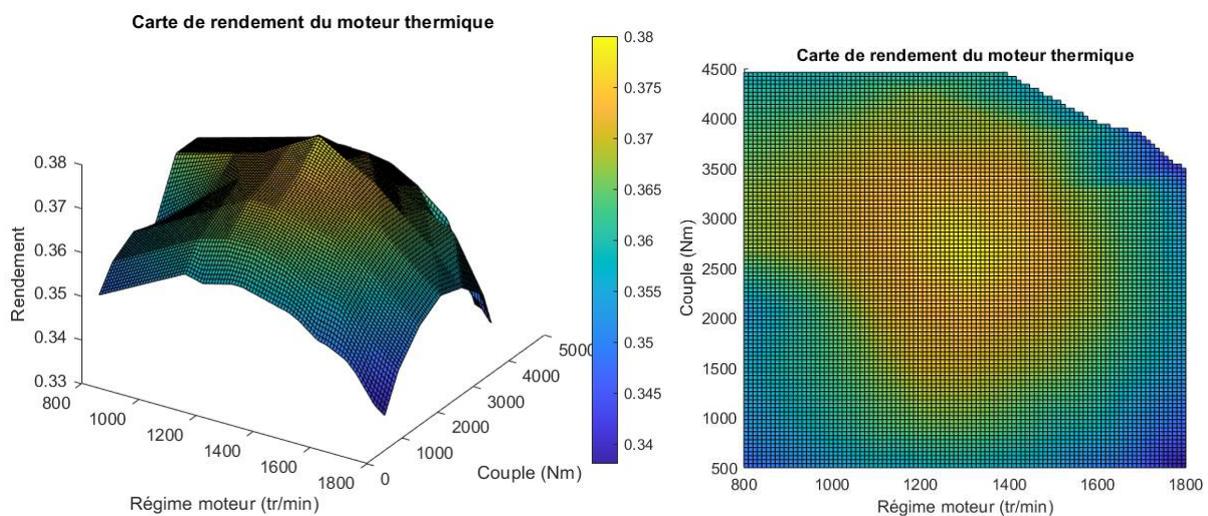


Figure 29. Cartographie en rendement du moteur thermique Mitsubishi® S652-T2MPTK

Modèle du moteur ABC® du Naoned

La cartographie du moteur de marque ABC n'est pas disponible. On sait seulement que la consommation spécifique est de 198 g/kWh au point de fonctionnement nominal, à la vitesse de rotation fixée sur le navire de $n_{m_nom} = 750$ tr/min, sûrement à la puissance utile nominale comprise entre 625 kW et 662 kW. En prenant une densité énergétique de 12.6 kWh/g pour le gasoil, on obtient un rendement de $\eta_{m_nom} = 0.4$ pour ce point de fonctionnement. C'est la seule donnée constructeur à disposition pour ce moteur !

Pour définir la courbe de rendement du moteur, l'essai de traction au point fixe réalisé lors des essais du 17 juillet 2024 a été exploité ; cet essai est le seul possible pour mesurer la force de poussée produite par l'hélice, mais cela implique une vitesse d'avance $u(t)$ nulle. Une fois le modèle d'hélice validé, et ayant accès à la mesure de la consommation instantanée du moteur, connaissant le régime moteur et donc celui de l'hélice, on peut reconstruire la puissance hélice, la puissance en sortie du moteur thermique, et la puissance chimique fournie par le

réservoir. On retrouve ainsi une première courbe de rendement du moteur (cf. Figure 31) qui culmine à 0.32 pour un maximum annoncé à 0.4 par le constructeur.



Figure 30. Photo de l'essai au point fixe - un dynamomètre est montée entre les funes et la chaîne d'amarrage pour mesurer la force de traction donc la poussée de l'hélice à vitesse nulle.

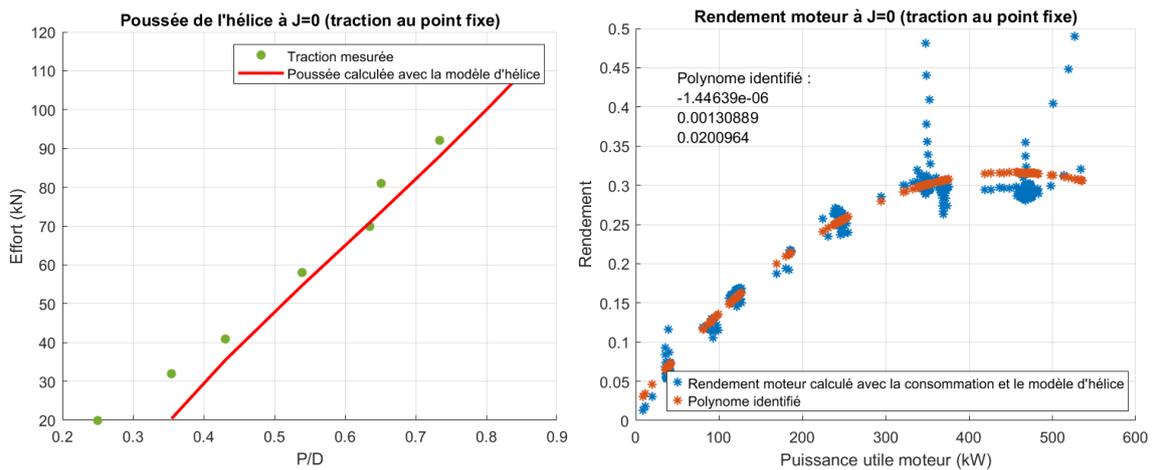


Figure 31. Poussée calculée avec le modèle de l'hélice (avec coef. de succion et de sillage) et mesure de traction (gauche) - Rendement moteur calculé avec la consommation mesurée et le modèle d'hélice (droite).

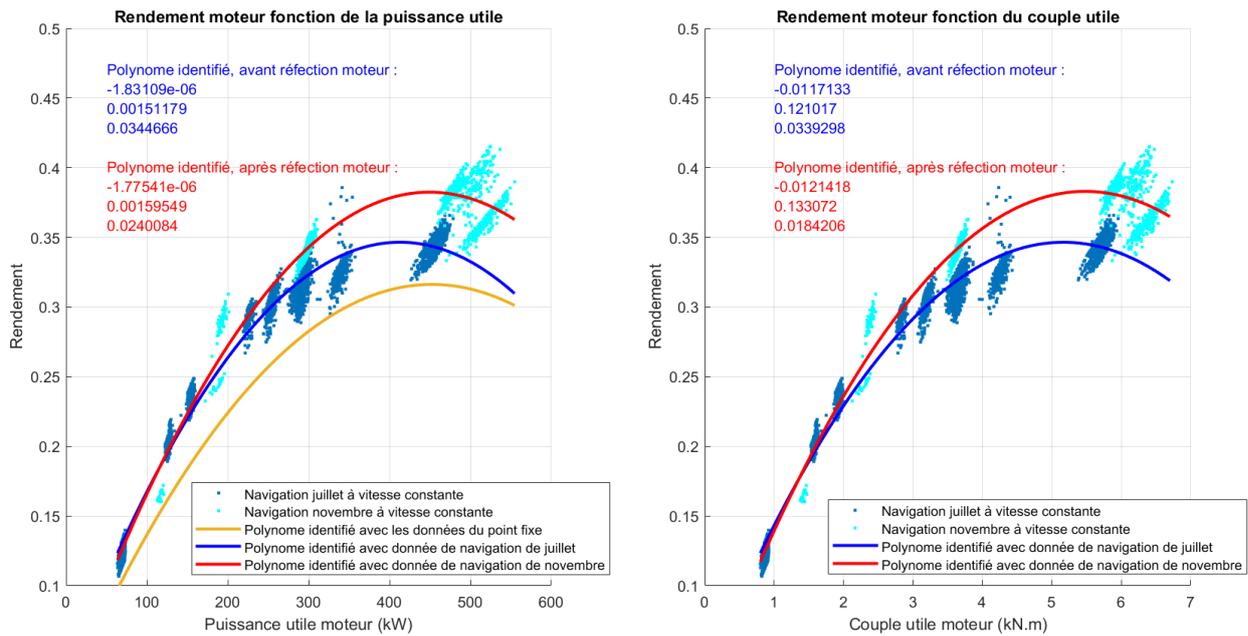


Figure 32. Calibration de la courbe de rendement du moteur sur la base des données en navigation ou en point fixe, avant et après sa réfection (juillet et novembre 2024).

Cet écart peut s'expliquer par différents arguments : l'essai au point fixe impliquant une vitesse d'avance nulle, on sait que la cartographie de l'hélice n'est pas réaliste. De plus, le moteur thermique est âgé, et une réfection est à prévoir. Ces hypothèses sont validées par les tracés de la Figure 32. Des mesures en navigation en juillet puis en novembre 2024, *i.e.* après la réfection du moteur (retouche de 3 cylindres), ont été réalisées, et les rendements du moteur thermique a été estimé sur la base du modèle d'hélice supposé bon et la consommation de carburant. On voit que les courbes de rendement en navigation tendent vers le point maximum de 0.4, notamment après réfection du moteur.

On a ainsi à disposition deux cartographies du moteur d'origine ABC_6DXC_760, avant et après réfection, partiel car disponible que pour le régime nominal $n_{m_nom} = 750$ tr/min. Cela est suffisant au final car le moteur n'est utilisé qu'à ce régime dans son architecture 100% thermique.

5. Modélisation de la transmission

L'organe principal est un réducteur fixe, reliant le régime moteur $n_m(t)$ au régime hélice $n_h(t)$. On le modélise simplement par un rapport de réduction entre les deux régimes R (et donc les couples $Q_m(t)$ et $Q_h(t)$), et un rendement constant η_r , qui englobe à des fins de simplification le rendement de l'arbre d'hélice.

Ajouter à ce réducteur, il faut modéliser aussi l'entraînement des pompes hydrauliques, et les poulies qui entraînent l'alternateur principal (cf. Figure 33. Schéma-bloc de la transmission du powertrain diesel.). Concrètement, ces deux organes sont modélisés par de simple puissance respectivement $P_y(t)$ et $P_e(t)$, prise à des valeurs constantes lorsque le scénario de simulation les active ; $P_e(t)=5kW$, $P_y(t)=60kW$ en manœuvre de filage, $P_y(t)=180kW$ en manœuvre de virage (données calibrées sur la base des analyses de données). Le modèle du réducteur est donc finalement :

$$Q_m(t) = \frac{RQ_h(t)}{\eta_r} + \frac{P_y + \eta_p P_e}{n_m},$$

avec $\eta_p = 0.5$ le rendement du système d'entraînement par courroie de l'alternateur principal.

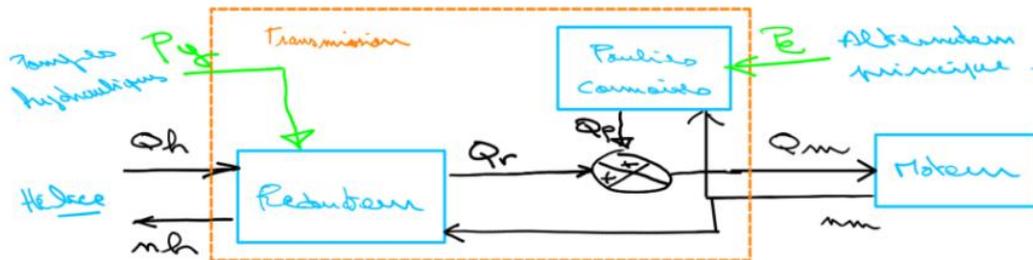


Figure 33. Schéma-bloc de la transmission du powertrain diesel.

6. Modèle du chalut

Le chalut est modélisé tout simplement par un effort de traction totale $T_c(t)$ appliqué à la coque du numérique ; cf. Figure 20 et Tableau 4. Le scénario de simulation active ou non la présence d'un chalut via le signal $gear_active(t)$. Pour chaque type de chalut – pélagique thon ou merlu, fond – des enregistrements type de l'effort $T_c(t)$ ont été générés à partir du logiciel Dynamit® par Le Drezen ; cf. Figure 35 pour illustration.

Vitesse (Nds)	Ouverture verticale (m)	Ouverture horizontale (m)	Ecart panneau (m)	Pose panneau (m)	Tension fune (kgf)	Tx (kgf)	Ty (kgf)	Tz (kgf)	Traction totale (kgf)
3	4,2	18,1	96,9	411	2817	-443	-572	2723	5429
3,1	4	18,1	97,8	382	2954	-468	-599	2855	5692
3,2	3,8	18,2	98,7	353	3091	-493	-626	2986	5954
3,3	3,6	18,2	99,7	323	3231	-520	-653	3121	6223
3,4	3,5	18,2	100,7	290	3382	-550	-683	3267	6513
3,5	3,5	17,8	100,7	253	3562	-579	-719	3440	6861
3,6	3,2	18,3	102,6	224	3693	-611	-744	3565	7110
3,7	3,1	18,3	103,6	191	3849	-641	-774	3716	7408
3,8	3	18,4	104,2	152	4033	-663	-811	3895	7749
3,9	2,9	18,4	104,9	116	4202	-703	-843	4055	8076
4	2,8	18,4	105,7	79	4373	-745	-877	4219	8410
4,1	2,5	18,4	106,3	40	4556	-782	-912	4394	8760
4,2	2,6	18,4	106,9	0	4728	-818	-941	4561	9103

Figure 35. Exemple de données calculées avec le logiciel Dynamit ; ici simulation chalut de fond.

7. Modèle du « speed pilot »

Le speed pilot modélise l'automate ou l'humain en charge du suivi du profil de vitesse $du(t)$ en commandant le pas de l'hélice, agissant directement sur sa poussée $T_h(t)$. Concrètement, un régulateur Proportionnel-Intégral-Dérivé (PID) a été implémenté, et calibré en simulation. Son expression théorique est :

$$\begin{cases} e(t) = du(t) - u(t) \\ pas(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \end{cases}$$

8. Modèle de l'Energy Management Controller « EMC »

Dans le cas du modèle M1 reproduisant exactement le comportement du Naoned, l'EMC a une implémentation triviale ; il impose un régime constant pour le moteur thermique $n_{m_nom} = 750$ *tr/min*, et transfère le pas de l'hélice désiré $pas(t)$ calculé par le régulateur PID.

9. Modélisation de l'effet de la houle

Comme énoncé lors des analyses des datas en lien avec l'effet de la houle (cf. paragraphe 2.4.5) la modélisation de l'impact de la houle sur la dynamique d'avance d'un navire, et son influence sur la consommation est selon nous un problème ouvert. Afin de prendre tout de même en compte cette perturbation *a minima* de manière macroscopique, nous nous sommes inspirés de l'ouvrage de référence [Hey88]^[1] qui suggère que des sollicitations dynamiques d'un moteur peuvent se traduire jusqu'à une augmentation de 50% de sa consommation spécifique (référéncée par sa cartographie).

Concrètement, dans notre cas nous avons modulé les cartographies de rendement des moteurs thermiques comme celle présentés en Figure 30 d'un facteur allant de 1 pour un état de mer à 0 (mer calme), à (1-20%) = 80% de rendement pour un état de mer de 8.

^[1] J.B. Heywood. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering. 1988.

e. Validation du modèle M1 par confrontation
avec les données expérimentales

Ce modèle M1 jouant le rôle de « jumeau numérique » du Naoned, il était important de confronter données de simulation et données expérimentales afin de valider son comportement.

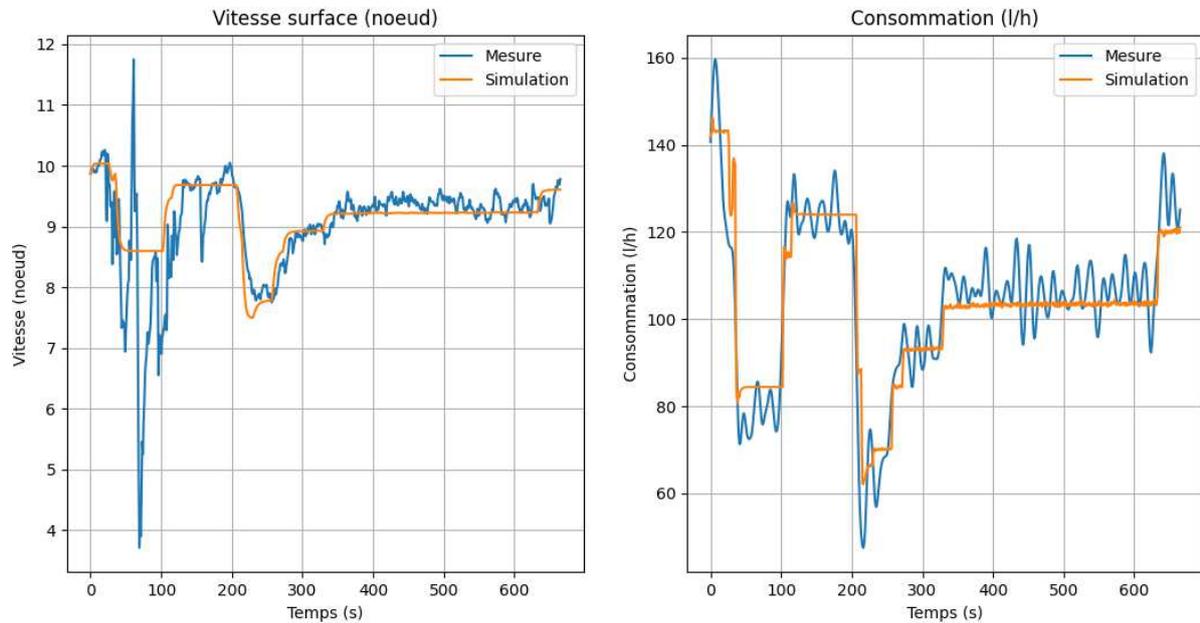


Figure 34. Simulation en navigation.

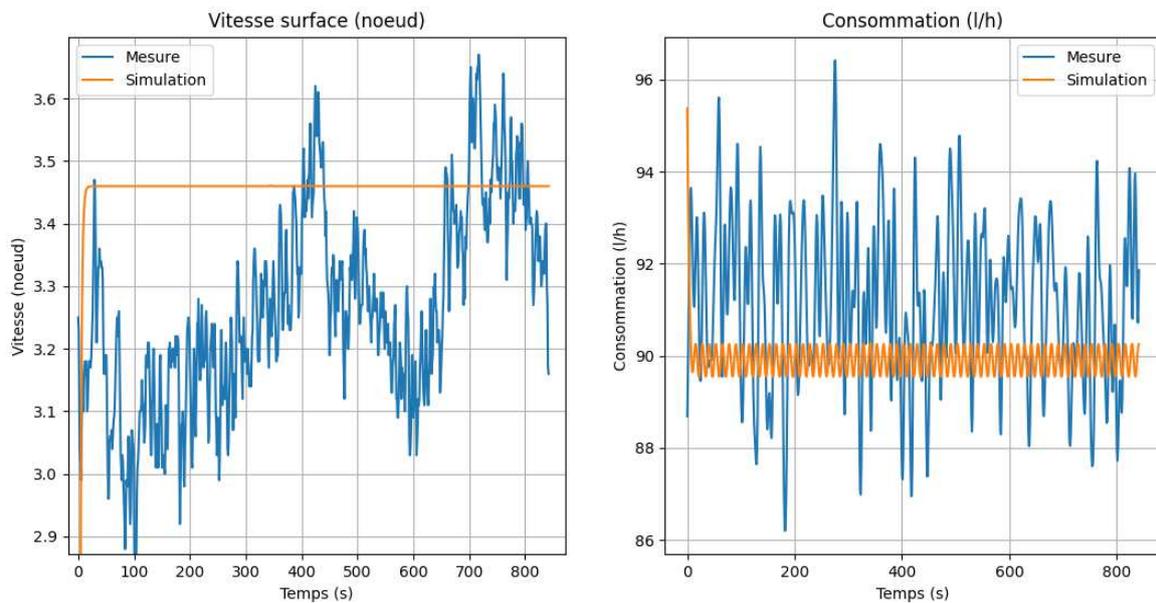


Figure 35. Simulation en pêche, pélagique au merlu.

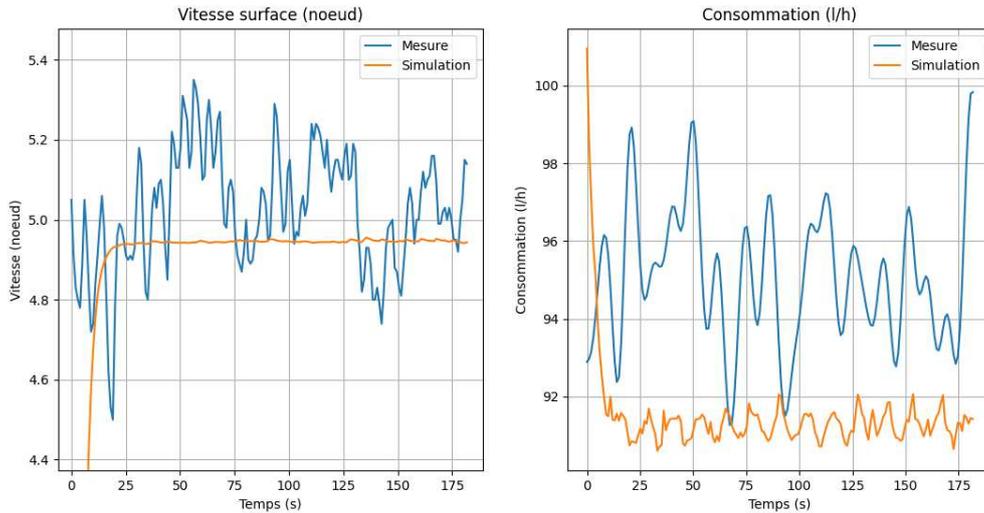


Figure 36. Simulation en pêche, pélagique au thon.

Des vérifications ont été effectuées au niveau de la vitesse du navire et de sa consommation, pour des profils de vitesse différents – et d’éventuelles mises à l’eau du chalut ; les Figure 34, Figure 35, et Figure 36 montrent respectivement les résultats obtenus en navigation seule, au pélagique merlu et thon respectivement. Pour la pêche au chalut de fond, aucune mesure n’a été effectuée avec le nouveau système d’instrumentation, mais des anciennes données et les témoignages des pêcheurs permettent cependant d’avoir les valeurs suivantes ; pour une traction du chalut à une vitesse de 3 noeuds, on observe une consommation de l’ordre de 105 l/h. La Figure 38 témoigne de performances semblables avec le simulateur.

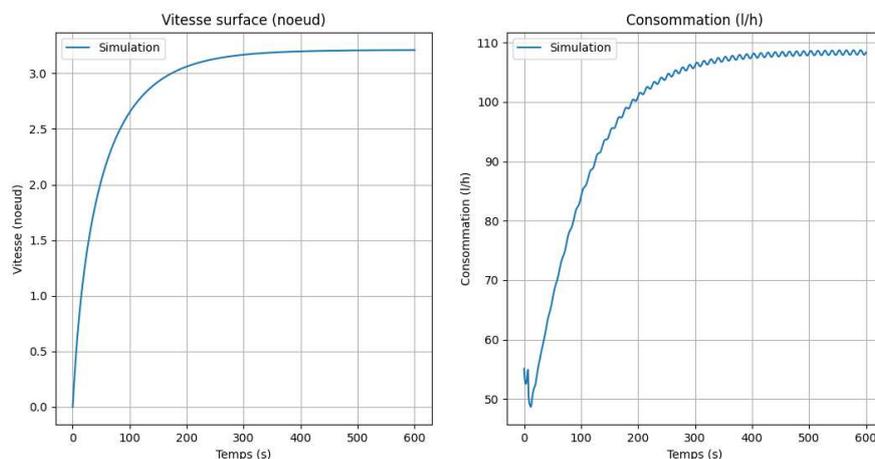


Figure 37. Simulation en pêche, chalut de fond.

Globalement la précision du simulateur nous semble tout à fait satisfaisante, au regard de la simplicité des modèles mis-en-œuvre. Etant donné les hypothèses et simplifications réalisées – comme la non-modélisation de l’impact du vent sur l’avance du navire, l’hypothèse d’un effort constant appliqué par le chalut, etc... Nous avons validé ce modèle fondamental M1, qui servira donc de référence pour estimer par la suite le gain en carburant obtenu à l’aide des autres powertrains dimensionnés et simulés

2. Définition de scénarios standards

La raison d’être du (des) modèles du navire et du simulateur dans sa globalité est d’estimer les gains de carburant que l’on peut espérer en changeant sa chaîne de propulsion, notamment en passant à une hybridation parallèle. Les analyses de données nous ont permis de voir que les consommations sont très impactées par les cas d’usage du navire (cf. Tableau 1). Afin d’avoir des simulations et des chiffres cohérents, des scénarios reprenant les temps passés représentatifs dans chacune des phases dimensionnantes – navigation, filage, traction du chalut, virage, à différentes vitesses ont été construits. Ce travail a été effectué selon deux niveaux ; des scénarios “minimalistes” ont été tout d’abord définis pour chaque mission de pêche ; cf. Tableau 6. Ceux-ci seront ceux utilisés plus loin dans l’analyse énergétique. Ce choix a été motivé pour des problématiques de temps et de coût de calcul ; dans le temps imparti au projet HYBA, le portage du simulateur sur son serveur de calcul définitif n’était pas possible. Les calculs ont donc été effectués sur un PC portable, nécessitant une adaptation des scénarios de simulation.

Tableau 6. Les 3 scénarios de pêche intégré dans le simulateur.

Pélagique thon	Pélagique merlu	Chalut fond
- 11% du temps à tracter le chalut,	- 45% du temps à tracter le chalut,	- 56.4% du temps à tracter le chalut,
- 37% du temps à 0 nœuds,	- 22% du temps à 0 nœuds,	- 8% du temps à 3 nœuds,
- 2% du temps à 3 nœuds,	- 1% du temps à 3 nœuds,	- 35% du temps entre 8 et 10 nœuds,
- 10% + 4% du temps à 6 nœuds,	- 5% + 4% du temps à 6 nœuds,	- 0.3% du temps au filage,
- 15% du temps 8 nœuds,	- 9% du temps 8 nœuds,	- 0.3% du temps au virage.
- 17% du temps à 10 nœuds,	- 10% du temps à 10 nœuds,	
- 1% du temps au filage,	- 0.6% du temps au filage,	
- 3% du temps au virage.	- 3.4% du temps au virage.	

Par la suite, des scénarios plus réalistes, simulant des missions de pêche de plusieurs jours (potentiellement 15 jours) ont été construits. Concrètement, les données brutes des signaux caractéristiques ont été tracées et analysées pour définir là encore les schémas caractéristiques.

Scénarios réalistes issues des Datas Collectées

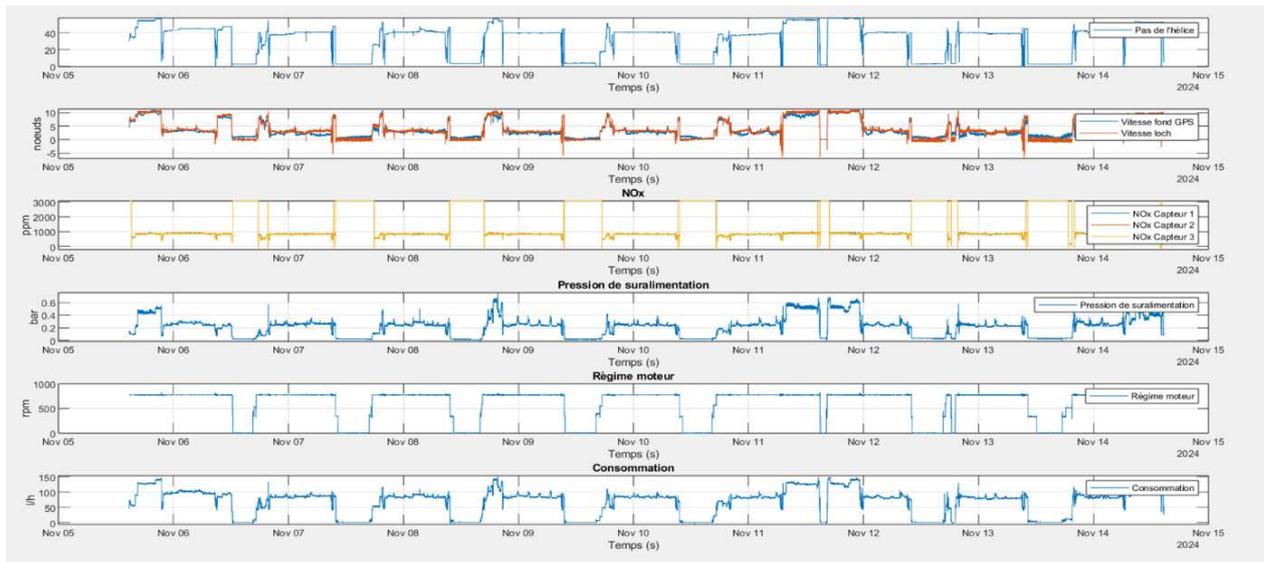


Figure 39. Extraits de datas brutes de plusieurs jours de pêche

On arrive à la conclusion que la marée de pêche est structurée en plusieurs phases clés, chacune présentant des profils distincts de consommation d'énergie et d'utilisation des équipements :

- Transit vers la zone de pêche : Le navire navigue à vitesse de croisière pour rejoindre la zone de pêche.
- Phase de recherche : L'équipage recherche les bancs de poissons à l'aide du sonar et effectue des manœuvres de navigation.
- Mise à l'eau du filet (filage) : Le filet de pêche est déployé dans l'eau.
- Chalutage : Le navire remorque le filet à une vitesse contrôlée pour capturer les poissons.
- Remontée du filet (virage) : Le filet est remonté à bord avec la capture.
- Pause à bord : L'équipage se repose pendant que le navire reste au mouillage ou à la dérive pour produire l'électricité nécessaire à bord.
- Transit retour : Le navire retourne au port.

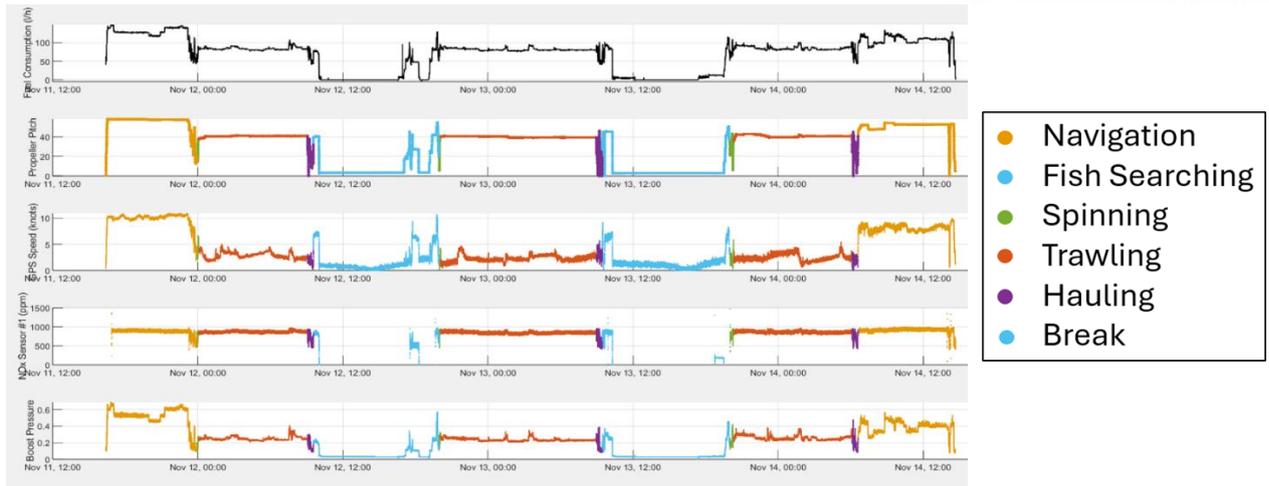
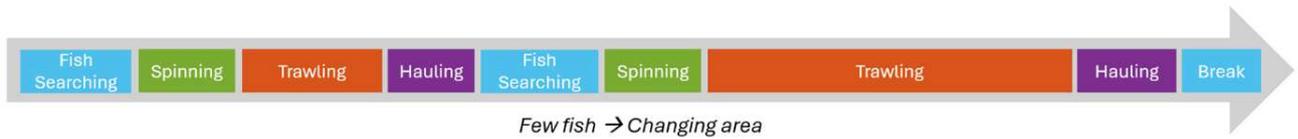


Figure 40. Mise en évidence des différentes phases avec un code couleur pour une meilleure visualisation

On aboutit donc à des scénarios types – dans le même esprit que ceux définis comme scénario plus minimaliste.



Finalement, on peut construire ainsi les signaux “artificiels” de simulation comme illustré dans les figures ci-dessous ; notons qu’ici on modélise aussi la masse de poissons cumulée dans le navire, car cette variation de masse pourra être considérée à termes dans l’analyse de la consommation du navire.

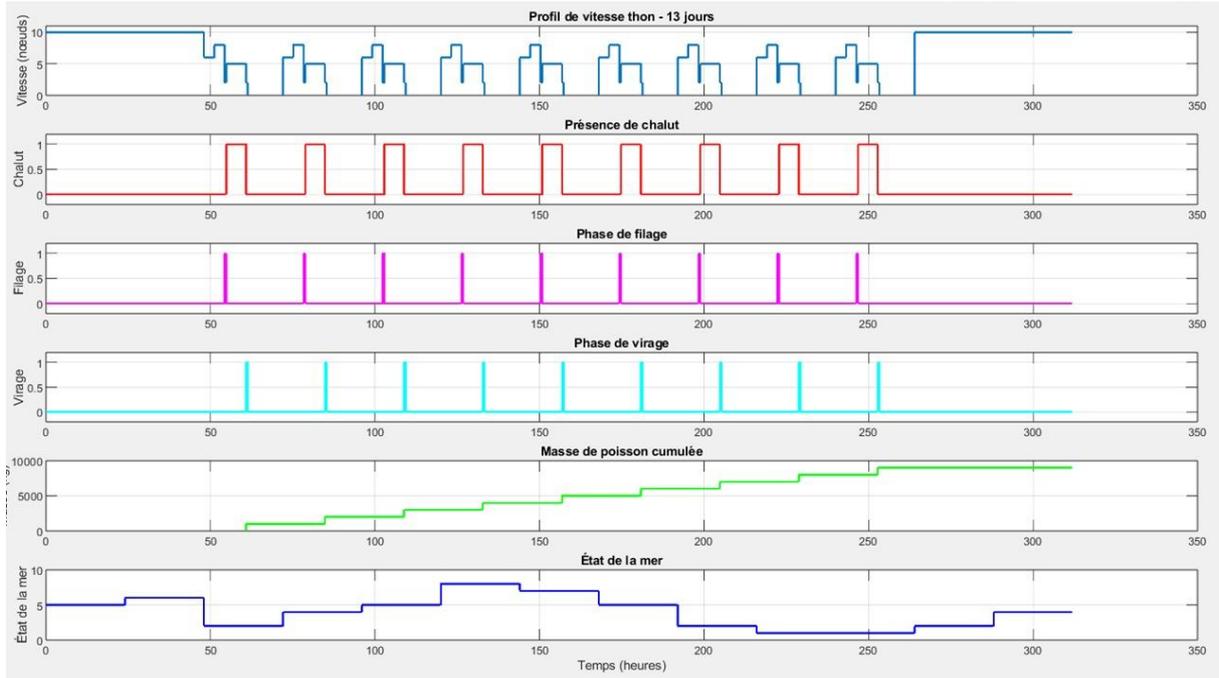


Figure 41. Scénarios « Pélagique Thon »

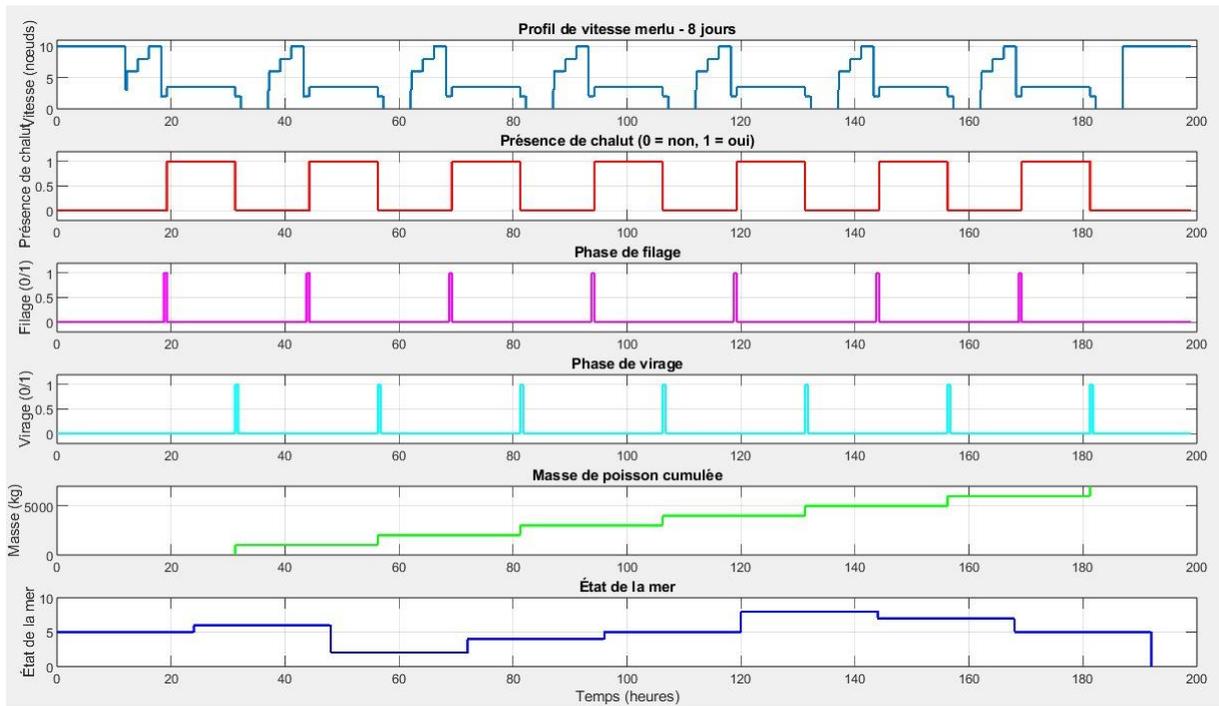


Figure 42. Figure 41. Scénarios « Pélagique Merlu »

3. Modèle énergétique M2 : dans une configuration hybride parallèle

Ce paragraphe constitue le livrable L.C.7.3 : Modèle énergétique numérique « M2 » du chalutier avec une propulsion hybride et documentation associée

WP-7.2 Traitement des données de consommation et analyse
Partenaires impliqués : IMT Atlantique et Vectura System
Date de démarrage : t0 + 3 mois Durée : 6 mois
Travaux réalisés : <ul style="list-style-type: none"> - Réalisation d'un modèle énergétique numérique « M1 » du chalutier existant - Réalisation d'un modèle énergétique numérique « M2 » du chalutier « rétrofitté » avec une hybridation parallèle - Estimation des gains en consommation de carburant par simulation numérique, sur la base des scénarios et modes de fonctionnement défini dans le workpackage associé.
Livrables : L.C.7.2 : Modèle énergétique numérique « M1 » du chalutier et documentation associée L.C.7.3 : Modèle énergétique numérique « M2 » du chalutier avec une propulsion hybride et documentation associée L.C.7.4 : Rapport d'analyse sur les gains de consommation en carburant basé sur simulation

a. Objectif

Comme énoncé précédemment, le Modèle M2 permet de simuler une architecture hybride parallèle, *i.e.* l'hybridation se fait au niveau du flux mécanique, les deux moteurs thermique et électrique apportant chacun leur couple au niveau du réducteur en prise avec l'arbre d'hélice. Nous nous attachons ici, comme dans le paragraphe 1 a ne décrire que l'architecture du simulateur au niveau « multi-physique ». Les gains énergétiques peuvent se faire de différentes manières sur les architectures M1 et M2, via le contenu de la loi de pilotage de l'hybridation ou EMC.

b. Méthodologie

La construction du modèle M2 suit en tout point celle du modèle M1.

c. Architecture générale du modèle du navire

Le modèle « M2 » intègre une propulsion hybride parallèle, repartant sur les mêmes bases que le modèle « M1 ». Au même titre que ce modèle, on peut résumer son architecture via les Figure et Figure . La Figure est semblable à l'architecture générale du modèle 100% thermique, seuls quelques signaux d'information en plus apparaissent entre l'EMC et le powertrain.

d. Modélisation des organes

Nous rajoutons dans ce modèle un moteur électrique et une batterie, et apportons des modifications au niveau de la transmission. Les paramètres et signaux des modèles sont ajoutés aux Tableau 4 et Tableau 5.

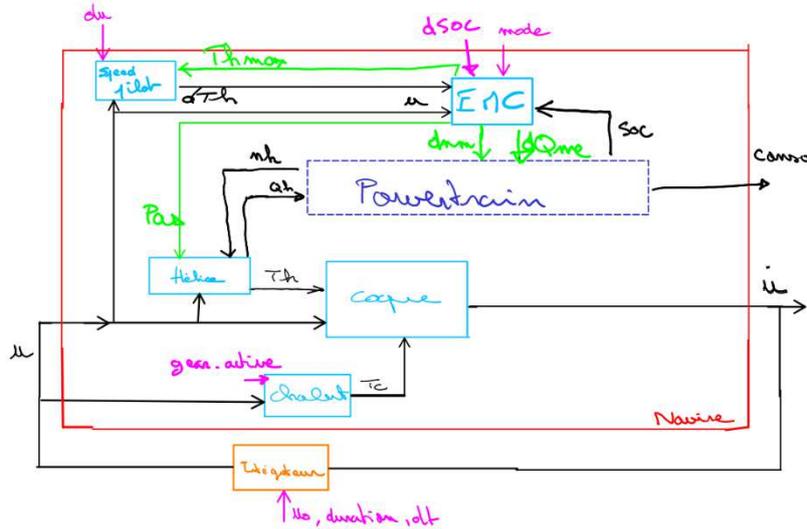


Figure 43. Architecture générale des modèles du Naoned, version M2 (Hybride) – ajout de certains signaux d’information liée à l’hybridation au niveau de l’EMC.

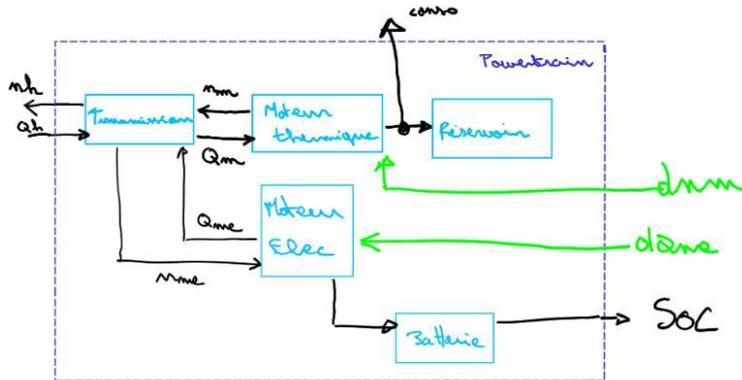


Figure 44. Schéma-bloc du powertrain hybride constitutif du modèle M2.

1. Modèle du moteur électrique

Comme pour le moteur thermique, une cartographie permet de simuler le moteur électrique. Ceux-ci sont fournis par les fabricants proposant des moteurs en adéquation avec nos besoins. La cartographie prend en entrée la vitesse de rotation du moteur $n_{me}(t)$ et le couple moteur fourni $Q_{me}(t)$ et donnant en sortie un rendement en puissance $\eta_{me}(t)$ (sans unité). Le modèle peut donc s’écrire macroscopiquement

$$\eta_{me}(t) = f_{me}(n_{me}(t), Q_{me}(t)).$$

Un exemple de cartographie, issue d'un moteur Bosch EMS1 – 16J20 est proposé à titre d'illustration en Figure 38. Notons que dans le cas du moteur électrique, il pourra recevoir une puissance négative (couple $Q_{me}(t) < 0$, régime $n_{me}(t) > 0$) fournie par le moteur thermique en phase de recharge de la batterie, ce qui implique une utilisation de la cartographie en symétrie si une cartographie spécifique à couple négatif n'est pas disponible.

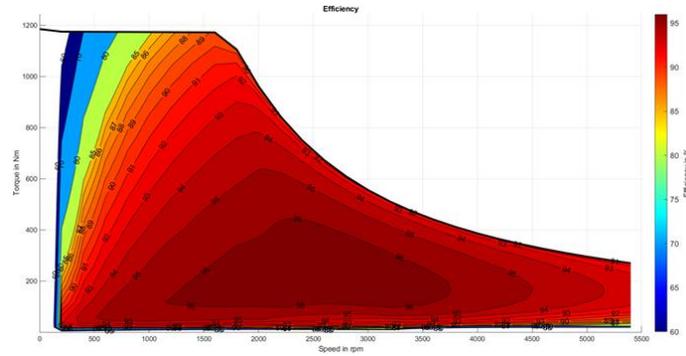


Figure 38. Exemple de cartographie d'un moteur électrique Bosch EMS - 16J20.

2. Modèle de la batterie

Un modèle basique a été élaboré ; le rendement en charge et décharge est considéré comme parfait, $\eta_b = 1$. La batterie est définie par sa capacité maximale Q_{b_max} en (kWh). Son état de charge $SOC(t)$ défini comme le ratio en pourcentage entre sa charge à l'instant t $Q_b(t)$ et sa charge maximale

Q_{b_max} possible, est calculé par une loi classique de Coulométrie.

$$SOC(t) = SOC_{init} + \frac{Q_b(t)}{Q_{b_max}} = SOC_{init} + \frac{1}{Q_{b_max}} \int_0^t I_b(\tau) / \eta_b d\tau.$$

avec $I_b(t) = P_b(t) / U_b$, $P_b(t)$ la puissance algébrique en sortie de batterie, U_b sa tension nominale. Il est surtout important de préciser que l'on cherchera ici à avoir une batterie de la plus petite capacité possible, pour des raisons de prix et de capacité d'emport du navire. Pour les mêmes raisons, on suppose que cette batterie ne pourra être rechargée que par le moteur thermique, et non par une recharge au port ; le navire sera une version « full hybrid » et non « plug-in » si l'on reprend les terminologies commerciales du domaine automobile.

3. Modèle de la transmission

Moteurs thermique et électrique sont connectés chacun via un rapport de réduction différent à l'arbre d'hélice. On a donc la relation suivante ;

$$Q_m(t) = \frac{R_m[Q_h(t) - R_{me}Q_{me}(t)]}{\eta_r} + \frac{P_y + \eta_p P_e}{n_m}.$$

Pour plus les détails sur la transmission, se référer au Chapitre dédié au Réducteur.

4. Les 4 modes de gestion énergétique intégrés dans l'EMC

Au final, 4 modes de fonctionnement, impliquant le développement de 4 versions de l'Energy Management Controller ont été identifiés ; deux pour l'architecture M1 100% thermique, deux pour l'architecture hybride parallèle M2. Pour chacune des architectures, on distingue en fait le cas où l'on considère un régime constant pour le moteur thermique (et donc pour l'hélice), ou pas. Les 4 modes sont résumés dans le Tableau 6.

Le **mode 1** est donc le mode de fonctionnement actuel du Naoned, ne permettant aucun degré de liberté pour optimiser la consommation énergétique à vitesse fixée $u(t)$.

Le **mode 2** est finalement connu pour les bateaux de travail, mais peu sur les chalutiers peut-être ; il s'agit de la « loi de conjugaison », qui permet, pour obtenir une poussée donnée $T_h(t)$, de trouver la combinaison ($pas(t), n_m(t)$) amenant au meilleur rendement de l'hélice, et donc à la consommation minimale ; des règles empiriques (tables) – calibrées parfois directement sur le navire – sont parfois utilisées pour mettre en œuvre cette stratégie. Nous avons essayé de traiter cette fonctionnalité avec les algorithmes d'optimisation temps réel issus du monde de l'hybridation automobile.

Le **mode 3** est finalement le plus proche de celui qui est traité dans le domaine automobile ; à régime constant, manipuler les couples des deux moteurs thermiques et électriques en parallèle $Q_m(t)$ et $Q_{me}(t)$, revient à chercher le bon point de fonctionnement permettant d'optimiser le rendement des deux moteurs, notamment celui du moteur thermique, tout en valorisant la présence du moteur électrique et en ménageant la batterie de « faible capacité » au regard des puissances mises en jeu.

Le **mode 4** s'autorise quant à lui tous les degrés de liberté ; étant à régime variable pour le moteur thermique $n_m(t)$, ce qui impose un régime $n_h(t) = \frac{n_m(t)}{R_m}$ pour l'hélice et $n_{me}(t) = \frac{R_{me} \cdot n_m(t)}{R_m}$, on peut comme pour le mode 2 jouer sur la combinatoire ($pas(t), n_m(t)$) pour obtenir la poussée désirée $T_h(t)$, aboutissant à un couple résistant de l'hélice vu par le moteur $Q_h(t)$. Ce choix donc être fait avec celui des couples parallèles $Q_m(t)$ et $Q_{me}(t)$. L'interdépendance paramétrique rend le problème complexe (et innovant !) dans sa formulation mathématique et sa résolution numérique, notamment temps réel.

Tableau 7. Résumé des 4 modes de pilotage énergétique du Naoned.

Modes	Modèle	Régime moteur	Degrés de liberté	Principe
Mode 1	M1 – Thermique	n_m constant	\emptyset	La vitesse $u(t)$ impose la poussée $T_h(t)$ et donc le $pas(t)$ de l’hélice.
Mode 2	M1 – Thermique	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$	À une vitesse $u(t)$ et donc poussée $T_h(t)$ donnée, on a plusieurs combinaisons ($pas(t), N_m(t)$) possibles.
Mode 3	M2 – Hybride	n_m constant	$Q_{me}(t)$	À une vitesse $u(t)$ et donc $pas(t)$ donné, le couple hélice $Q_h(t)$ est produit par plusieurs combinaisons ($Q_m(t), Q_{me}(t)$) possibles.
Mode 4	M2 – Hybride	$n_m(t)$ variable	$n_m(t), Q_{me}(t)$	À une vitesse $u(t)$ et donc poussée $T_h(t)$ donnée, on peut jouer sur les combinaisons ($pas(t), N_m(t)$) et ($Q_m(t), Q_{me}(t)$), en considérant leur Interaction.

e. Algorithme d'optimisation

Les véhicules hybrides intègrent plusieurs sources d'énergie et systèmes de stockage, complexifiant la maîtrise des flux énergétiques. Des lois de gestion spécifiques sont nécessaires pour optimiser la production, le stockage et la distribution d'énergie entre les différentes sources, garantissant un rendement global maximal. Nous avons donc besoin d'une unité de contrôle centrale, l'EMC, connectée à tous les composants : batterie, moteurs thermique et électrique, convertisseurs, et dans notre cas hélice. Cette unité requiert la connaissance en temps réel des informations critiques comme l'état de charge des batteries, la vitesse du bateau, et le point de fonctionnement des composants. Finalement l'EMC traduit les demandes du pilote en consignes de puissance ou d'effort / flux et gère la répartition des flux énergétiques.

Plusieurs approches ont été développées pour optimiser la distribution énergétique et accroître l'autonomie en minimisant la consommation. Les méthodes se divisent en deux catégories principales [Gao14]^[1] :

- **Les approches hors ligne** : nécessitent la connaissance préalable du profil de mission. Ce type de problème est donc traité que lors des phases de dimensionnement d'une chaîne de propulsion hybride. La programmation dynamique, basée sur le principe de Bellman, est souvent la solution privilégiée pour traiter le problème. Elle fournit un optimum global mais présente des limites liées au pas de discrétisation qui affecte les temps de calcul et la qualité de solution. Une autre approche souvent utilisée est celle dite du contrôle optimal basé sur le principe de Pontriaguine reposant sur le calcul des dérivées de la fonction de l'Hamiltonien. Cette méthode nécessite toutefois des approximations polynomiales, ce qui peut conduire à des erreurs d'approximation. Ces deux solutions sont toutefois séduisantes car elles permettent de traiter le problème d'optimisation dans sa globalité ; formulation d'un critère potentiellement mixte – réduction de la consommation de carburant, mais avec la prise en compte d'objectif annexe comme la réduction des Nox par exemple, prise en compte explicite des contraintes – par exemple sur les saturations de puissance, l'état de charge de la batterie, etc...
- **Les approches en temps réel** : elles n'utilisent que la demande instantanée pour générer les références aux convertisseurs. Ce sont donc les approches exploitées pour piloter une architecture hybride en embarqué sur le véhicule. Les techniques choisies incluent les heuristiques quasi-Newton, les stratégies de minimisation de consommation équivalente (ECMS), et les approches comme l'optimisation par essaims de particules et / ou la logique floue. La commande dite MPC (Modèle Prédictive Control) est une solution de plus en plus retenue pour adapter les avantages de la commande optimale au cas du temps réel.

Dans le cas du projet HYBA, nous sommes actuellement dans une phase de dimensionnement. Toutefois, nous devons garder à l'esprit les éléments suivants :

- Le temps de calcul est un élément dimension car l'objectif est de valoriser à terme les algorithmes développés dans un outil de dimensionnement, devant tester plusieurs combinaisons d'architecture hybride afin de trouver la configuration optimale.
- Une fois la combinaison d'organes optimale trouvée, l'objectif est bien d'hybrider le Naoned, et il faudra alors avoir rapidement un EMC temps réel.

Au regard de ces contraintes, **une solution de stratégie de minimisation de consommation équivalente (ECMS)** basée sur les travaux de l'ouvrage de référence [GS13]^[2] a été choisie. Il s'agit d'une stratégie développée pour une mise en œuvre temps réel, mais au regard des arguments précédemment cités, elle correspond parfaitement au contexte du projet HYBA.

Génériquement, un problème d'optimisation pour l'hybridation d'un véhicule – typiquement notre « mode 3 », se formule mathématiquement ainsi – en reprenant les notations des Tableaux 4 et 5, et notamment $P_m(t) = Q_m(t) \cdot \eta_m(t)$ et $P_{me}(t) = Q_{me}(t) \cdot \eta_{me}(t)$ les puissances mécaniques fournies par le moteur thermique et électrique respectivement ;

$$\text{Minimiser : } J = \int_0^T \dot{m}_{fuel}(P_m(t)) dt$$

Sous contraintes :

- $P_m(t) + P_{me}(t) = P_{demande}(t)$
- $0 \leq P_m(t) \leq P_{m_max}(t)$
- $P_{me_min}(t) \leq P_{me}(t) \leq P_{me_max}(t)$
- $SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$
- $SOC(T) = SOC(0)$

$$- \frac{dSOC}{dt} = - \frac{1}{Q_{b_max} \cdot \eta_b \cdot U_b} P_{me}(t)$$

La présence des contraintes, qui explicitement directement les contraintes physiques rendent le problème confortable à la lecture, mais alourdit considérablement la résolution numérique du problème. La stratégie proposée par L. Guzzella and A. Sciarretta, permet de contourner cette difficulté en ramenant toutes les contraintes notamment liées à la machine électrique et la batterie dans le critère à minimiser, via un terme pondéré comme suit ;

$$\text{Minimiser : } J = P_m(t) + s_0 P_b(t)$$

avec $P_b(t)$ qui est pour rappel la puissance fournie au moteur électrique par la batterie. La pondération s_0 peut être vu comme un facteur d'équivalence, qui permet de calculer un « coût équivalent puissance thermique » à l'énergie puisée à un instant t dans la batterie, qui résume

finalement les équations du problème initial qui modélise les échanges d'énergie entre les deux machines. On ne prendra plus explicitement en considération les contraintes « min / max » des puissances et du SOC, mais on réglera le terme s_0 en temps réel – on le notera alors $s(t)$ – par exemple en fonction de l'état de charge de la batterie. En choisissant par exemple $s(t) = K.(SOC(T) - SOC(t))$, avec K une constante à régler, on s'assure que le « coût » de l'énergie électrique augmente lorsque la batterie a un état de charge qui s'éloigne dangereusement de l'état de charge final espéré $SOC(T)$.

Enfin, pour résoudre le problème d'optimisation (minimisation) à moindre coût, les auteurs proposent de discrétiser l'espace des solutions selon un nombre de points adaptés aux capacités du ordinateur, de calculer toutes les combinaisons du critère, et de choisir la solution la plus faible. Concrètement cela veut dire qu'il est tout à fait envisageable d'implémenter cet algorithme à termes dans le navire.

Nous ne présenterons pas en détail la déclinaison de cette solution algorithmique aux 4 modes listés dans le Tableau 6, mais c'est bien elle qui a été appliquée à chaque fois. Il est important de souligner toutefois que cette simplification a une contre-partie ; rien ne garantit a priori que la solution obtenue est la solution optimale. Il est important de garder en tête cela, lors de l'analyse des résultats obtenus.

^[1] Y.Gaoua, « Modèles mathématiques et techniques d'optimisation non linéaire et combinatoire pour la gestion d'énergie d'un système multi-source : vers une implantation temps-réel pour différentes structures électriques de véhicules hybrides », Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2014. Français. [<NNT : 2014INPT0124>](#). [<tel-01096744v2>](#)

^[2] L. Guzzella and A. Sciarretta, Vehicle propulsion systems: introduction to modeling and optimization. 3rd edition, Springer, 2013.

f. Réduction des NOx grâce à l'hybridation parallèle d'un bateau : Transposition positive des résultats automobiles

1. Introduction : Origine, limites et perspectives de l'étude

Ce chapitre s'appuie sur des résultats issus du secteur automobile, utilisant des cycles de tests réglementaires tels que FTP, WLTP, ARTEMIS et NEDC. À ce stade, l'étude n'a pas encore bénéficié de simulations spécifiques sur un moteur marin. Cependant, la richesse des analyses automobiles offre une base solide pour envisager l'application de ces stratégies au secteur maritime, notamment dans le contexte des zones NECA (Nitrogen Oxides Emission Control Area) définies par l'OMI, où la réduction des NOx est un enjeu majeur.

La validation réelle sera réalisée lors de la phase 2 du projet, grâce à la mise en pratique et aux mesures sur le démonstrateur industriel déjà équipé de capteurs NOx afin de pouvoir comparer le avant/après.

2. Contexte réglementaire et enjeux pour le maritime

Les zones NECA imposent des limites strictes sur les émissions de NOx pour les navires. L'intégration de l'hybridation parallèle dans la propulsion maritime s'inscrit parfaitement dans cette dynamique de transition écologique, en offrant une voie innovante pour répondre à ces exigences tout en maintenant l'efficacité opérationnelle des navires.

3. Principes et modes de l'hybridation parallèle en Automobile

Le système hybride parallèle alterne intelligemment entre plusieurs modes :

- **Mode CD (Charge Depleting)** : activé lorsque le SOC (état de charge) est supérieur à 30 %, privilégiant l'utilisation du moteur électrique.
- **Mode CS (Charge Sustaining)** : enclenché lorsque le SOC atteint 30 %, maintenant la charge via le moteur thermique.
- **Mode Blended** : combinaison dynamique des deux modes, ajustée en temps réel selon le SOC et la demande de puissance.

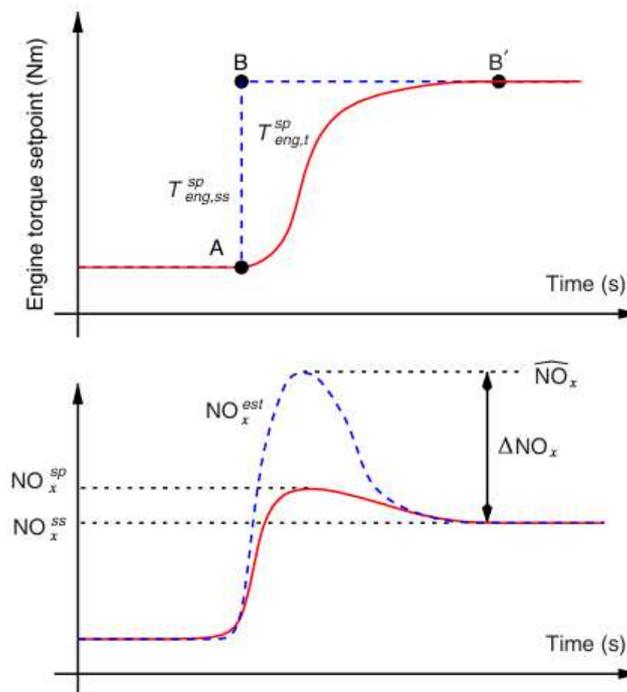
Cette flexibilité permet d'optimiser le rendement global du système de propulsion, en limitant le fonctionnement du moteur thermique aux plages les plus efficaces et en réduisant les émissions lors des phases critiques.

4. Mécanismes de réduction des NOx

Les analyses issues du secteur automobile montrent qu'il est possible de réduire les émissions de NOx d'environ 40 % sur le cycle FTP, avec une augmentation très faible de la consommation de carburant (inférieure à 5 %).

Les bénéfices principaux observés sont :

- **Lissage des pics de couple** grâce à l'apport du moteur électrique, ce qui limite les pointes d'émissions lors des accélérations ou des variations rapides de charge.
- **Optimisation du fonctionnement du moteur thermique** : celui-ci recharge la batterie à forte charge, dans des conditions de rendement élevé.
- **Stratégies de contrôle avancées** pour compenser les pics de NOx en transitoire, en ajustant la trajectoire du couple moteur.



Source : *Energy management Strategies for Diesel Hybrid Electric Vehicle ; IFP Energies nouvelles*

Le modèle utilisé pour prédire les émissions de NOx est semi-physique, inspiré de la cinétique des NOx, et calibré à partir de données expérimentales automobiles. Il prend en compte :

- La température maximale en chambre de combustion,
- Le ratio de gaz brûlés recyclés (BGR),
- La vitesse moteur.

5. Gestion des transitoires et modélisation

Lors des phases transitoires, la composition des gaz dans le collecteur d'admission diffère du régime permanent. Pour modéliser cette dynamique, un filtre de premier ordre retardé est utilisé où les constantes de temps et le retard dépendent de la vitesse du moteur. Cette approche permet de mieux anticiper et compenser les pics de NOx lors des variations rapides de couple, un enjeu particulièrement pertinent pour les cycles de navigation en présence de houle.

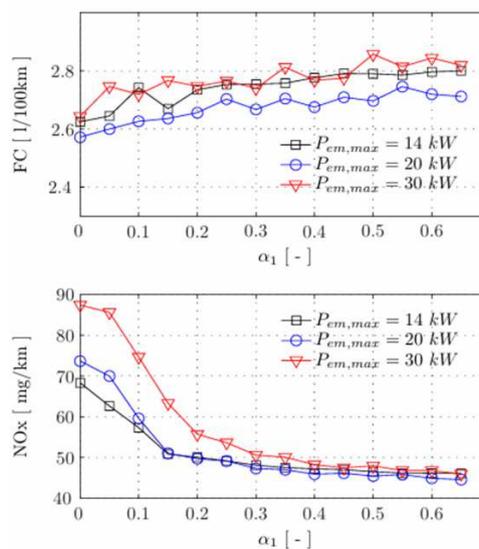
6. Intégration dans la stratégie d'optimisation énergétique

D'après les publications scientifiques de l'IFPEN, il est possible d'optimiser simultanément les émissions de NOx et la consommation de carburant. Ainsi, la stratégie EMS hamiltonienne pourrait être adaptée ultérieurement pour prendre en compte ces deux critères. Dans cette approche, la puissance carburant (P_{fuel}) est remplacée par la somme de la consommation de carburant et des émissions polluantes, permettant d'intégrer directement l'impact environnemental dans la gestion énergétique.

$$L(\cdot) = P_{fuel}(u, t) = Q_{lhv} \dot{m}_f(u, t) \longrightarrow P_{fuel}^* = Q_{lhv} [(1 - \alpha_1) \dot{m}_f + \alpha_1 \dot{m}_{NO_x}]$$

$$J = \int_0^{t_f} L(\xi, u, t) dt \longrightarrow J = \int_0^{t_f} P_{fuel}(t) \cdot (1 - \alpha_1) + P_{NO_x}(t) \cdot \alpha_1 dt$$

Les résultats publiés mettent en évidence un potentiel de réduction des émissions de NOx d'environ 40 % sur le cycle FTP, avec une augmentation très modérée de la consommation de carburant, inférieure à 5 %. Ces performances démontrent l'efficacité de l'optimisation hybride, qui permet de concilier respect des normes environnementales et maintien de l'efficacité énergétique du système.



Source : Energy management Strategies for Diesel Hybrid Electric Vehicle ; IFP Energies nouvelles

7. Transposition positive au secteur maritime

Bien que les résultats initiaux proviennent du secteur automobile, de nombreux principes sont directement transposables au maritime, notamment :

- La gestion intelligente des modes hybrides pour optimiser le rendement et limiter les émissions,
- L'importance du lissage des transitoires de couple, particulièrement pertinent lors des phases de manœuvre, de variation de vitesse, et bien entendu dans la houle
- L'applicabilité des modèles semi-physiques pour prédire les émissions et piloter la stratégie de contrôle.

Les moteurs marins, caractérisés par des régimes plus bas et des charges prolongées, pourraient même permettre d'obtenir des réductions d'émissions encore plus importantes, en exploitant pleinement les avantages de l'hybridation.

La prochaine étape consistera à adapter et valider ces stratégies dans un contexte maritime réel, lors de la phase 2 du projet, grâce au démonstrateur industriel. Cette démarche offrira une opportunité unique de confirmer et d'optimiser les bénéfices attendus pour la réduction des NOx en navigation.

8. Conclusion

L'hybridation parallèle représente une solution prometteuse pour la réduction des émissions de NOx dans le transport maritime, en s'appuyant sur des stratégies déjà testées dans l'automobile.

La phase 2 du projet, avec la mise en œuvre sur un démonstrateur industriel, permettra de valider expérimentalement ces approches et d'ajuster les modèles aux spécificités navales. Cette étape sera déterminante pour confirmer le potentiel de l'hybridation parallèle et contribuer activement à la transition écologique du secteur maritime.

4. Analyse des gains de consommation en carburant en fonction du rétrofit choisi (4 modes) pour le Naoned

Ce paragraphe constitue le livrable L.C.7.4 : Rapport d’analyse sur les gains de consommation en carburant basé sur simulation

WP-7.2 Traitement des données de consommation et analyse
Partenaires impliqués : IMT Atlantique et Vectura System
Date de démarrage : t0 + 3 mois Durée : 6 mois
Travaux réalisés : <ul style="list-style-type: none"> - Réalisation d’un modèle énergétique numérique « M1 » du chalutier existant - Réalisation d’un modèle énergétique numérique « M2 » du chalutier « rétrofitté » avec une hybridation parallèle - Estimation des gains en consommation de carburant par simulation numérique, sur la base des scénarios et modes de fonctionnement défini dans le workpackage associé.
Livrables : L.C.7.2 : Modèle énergétique numérique « M1 » du chalutier et documentation associée L.C.7.3 : Modèle énergétique numérique « M2 » du chalutier avec une propulsion hybride et documentation associée L.C.7.4 : Rapport d’analyse sur les gains de consommation en carburant basé sur simulation

a. Objectifs

C’est dans cette partie que nous allons analyser les gains de consommation en fonction des « rétrofits » possibles du Naoned ; Diesel avec loi de conjugaison (mode 2), Hybride à régime moteur constant (mode 3), ou Hybride à régime moteur variable (mode 4). Afin d’être exhaustif, nous calculerons aussi les gains de consommation dans le cas d’un simple remplacement du moteur diesel tout en restant sur un mode à régime constant (mode 1) ; avec le moteur d’origine (marque ABC) à l’état neuf, et avec un moteur de marque Mitsubishi ayant des caractéristiques différentes.

b. Méthodologie

Les 3 scénarios définis au Tableau 6 sont considérés pour chaque configuration matérielle de la propulsion du Naoned – et celle d’origine pour point de référence – les gains en consommation relatifs sont calculés.

Pour réaliser les simulations, il a fallu paramétrer les différents modèles des moteurs thermique et électrique, batterie, réducteur sur la base de matériels existants ; à terme, l’utilité des modèles développés est bien de servir de cœur de calcul pour un outil de dimensionnement automatique comme par exemple [OpenMDAO](#) pour choisir la configuration optimale ; partant d’une base de données pour les différents organes, on trouve la configuration optimale. Une première base d’organes a été listée dans le livrable **L.C.9.2**. Mais dans le temps imparti il n’a pas été possible de tester toutes les configurations possibles ou de s’interfacer avec un environnement aussi complexe que OpenMDAO.

Un pré-dimensionnement « manuel » a donc été réalisé, et les simulations ont été effectuées sur la base de deux moteurs thermiques, à des points de fonctionnement différents : le moteur original ABC 6DXC_760 et le moteur Mitsubishi® S6R2-T2MPTK. On considère un seul moteur électrique (les modèles identifiés ayant des cartographies assez similaires sur les plages de fonctionnement considérées), 2 batteries et 3 réducteurs, cf. Tableau 8. L'objectif n'était pas ici de trouver *la* configuration optimale, mais d'estimer toute chose égale par ailleurs le gain intrinsèque d'une loi de conjugaison seule (mode 2), d'un hybridation sans loi de conjugaison (mode 3), ou d'un couplage de deux degrés de liberté (mode 4). Nous conserverons la même hélice que celle actuellement présente sur le Naoned, ceci était finalement un pré-requis dans le cadre du projet.

Tableau 8. Listes des organes choisis pour le comparatif de consommation entre les différentes architectures de rétrofit.

Moteurs Thermiques	Moteurs Electriques	Batteries	Réducteurs Moteur Thermique R_m	Réducteurs Moteur Electrique R_{me}	Hélices
ABC_6DXC_760	Bosch EMS1 16J20	Lehmann AN25105 – 100kWh	4.668	6.608	Ka 4-55 tuyère 19A D 2070
Mitsubishi S6R2-T2MPTK		Lehmann_AN25106 – 200 kWh	5.103		
			5.913		

Seuls les résultats obtenus avec les organes en gras dans le tableau sont analysés ici, la prise en compte des autres configurations n'apportant pas d'amélioration d'un point de vue consommation, et ne sont pas plus illustratifs vis-à-vis des gains entre les différents modes de rétrofit.

c. Résultats

Les scénarios de pêche de la colonne de gauche dans le Tableau 9 de résultats font échos à ceux définis dans le Tableau 6 ; les modes sont définis dans le Tableau 7. Toutes les simulations ont été faites avec une modélisation d'un état de mer de 4 (état moyen).

Les résultats et les gains mentionnés prennent pour référence le moteur ABC actuel (usé)

Tableau 9. Tableau des gains de consommation en fonction des 4 architectures de retrofit et des scénarios de pêche.

		Consommations simulées Dans tous les cas : état de la mer 4 Gains de consommation (%) par rapport au moteur ABC actuel (usagé)						
		Mode 1 (Diesel, régime constant)		Mode 2 (Diesel, régime variable)	Mode 3 (Hybride, régime constant)	Mode 4 (Hybride, régime variable)	Mode 4 - "Peak Shaving" (Hybride, régime variable)	
		Moteur ABC		Moteur Mitsubishi				
		Actuel (référence)	Neuf	nm = 1300 rpm Rm = 5,103	nm e [1200rpm, 1500rpm] Rm = 5,103	Hybride nm = 1300 rpm Rm = 5,103 / Rme = 6,608 Bosch EMS1 16J20 Lehmann_AN25106	Hybride nm e [1200rpm, 1500rpm] Rm = 5,103 / Rme = 6,608 Bosch EMS1 16J20 Lehmann_AN25106	Hybride nm e [1200rpm, 1500rpm] Rm = 5,103 / Rme = 6,608 Bosch EMS1 16J20 Lehmann_AN25106
		Gains de conso par rapport au moteur ABC actuel (usagé)						
Scénario de pêche	Pélagique thon	0,0	7,3	15,6	18,1	16,6	19,9	27,2
	Pélagique merlu	0,0	6,8	13,2	15,7	14,0	17,3	24,9
	Fond	0,0	6,2	6,4	8,4	7,3	9,7	17,9
	Fond Optimisé	0,0	6,9	7,7	9,5	8,4	10,8	18,8
Gains moyens		0,0	6,8	11,7	14,1	12,6	15,6	23,3
Gains moyens pondérés	2022	0,0	6,6	10,7	13,0	11,6	14,5	22,3
	2023	0,0	6,7	11,4	13,8	12,3	15,3	23,1
	2024	0,0	6,9	13,7	16,2	14,6	17,8	25,4

Tableau 10. Annexe : pondérations du temps passé par chaque type de pêche, pour calculer le gain (%) de chaque solution technique en fonction des activités de pêche.

Pondérations du temps sur une année			
	2022	2023	2024
Pélagique thon	17,5%	14,3%	21,0%
Pélagique merlu	40,0%	54,8%	79,0%
Fond	42,5%	30,9%	0,0%

Pour les simulations en mode 1 et 3, *i.e.* à régime moteur thermique fixe, le moteur ABC est considéré à son régime nominal de $n_m = 750 \text{ tr/min}$, et le moteur Mitsubishi à $n_m = 1300 \text{ tr/min}$. D'autres régimes ont été simulés, mais cela a démontré que ces régimes sont optimaux, comme on pouvait s'y attendre, car ils permettent de passer par le rendement optimal des deux moteurs. Le choix des réducteurs a été guidé simplement pour assurer la même vitesse de rotation de l'hélice n_h constante, identique à celle du Naoned à l'heure actuelle – ceci afin de permettre une comparaison n'engageant que les éléments dimensionnant en amont de la chaîne de propulsion.

La colonne « Mode 1 / ABC actuel » représente donc la consommation obtenue avec le moteur du Naoned dans son état actuel ; elle joue donc le point de référence sur la base de laquelle les gains de consommation sont calculés. On considère aussi le cas où l'on implémente exactement le même moteur ABC mais neuf (une cartographie calée sur ses performances à l'état neuf a été implémentée pour le simuler), cf. colonne « Mode 1 / ABC neuf ». La colonne « Mode 1 / Moteur Mitsubishi » considère donc le moteur Mitsubishi S6R2-T2MPTK neuf, seul, à régime constant.

La colonne « Mode 2 » avec le même moteur considère toujours ce même moteur, mais à régime variable, dans une plage de régime comprise entre 1200 tr/min et 1500 tr/min où se situent les meilleurs rendements de ce moteur.

La colonne « Mode 3 » considère ce moteur à régime constant, mais hybridé par le moteur électrique Bosch + Batterie, la première colonne du « Mode 4 » représente finalement la combinaison des deux précédentes colonnes, i.e. un régime variable entre 1200 tr/min et 1500 tr/min est toléré pour le moteur thermique, qui agit en hybride parallèle avec la motorisation électrique.

La dernière colonne « Mode 4 – Pic shaving » analyse un cas « extrême » plus prospectif ; La stratégie de pilotage de l'EMC a été retouchée de manière idéaliste, permettant un rejet parfait de l'effet de la houle par la seule action du moteur électrique ; ce qui permet au moteur thermique de fonctionner en régime largement statique, à des points de rendement avantageux pour lui. D'un point de vue fonctionnel cela pourrait être le fonctionnement idéal d'une propulsion hybride sur un navire.

Une fois définis ces différentes hypothèses d'architecture, nous pouvons analyser les gains en consommation ; les scénarios de pêche en pélagique thon ou merlu aboutissent en première approximation aux mêmes conclusions, et le scénario de pêche au fond présente les mêmes conclusions, mais avec des tendances moins marquées.

1. Analyse des résultats en Mode 1

Tout d'abord, on observe que le remplacement du **moteur ABC** par un moteur de même marque, mais **neuf**, permettrait de gagner sur les 3 types de pêche **6 à 7 % de gain de consommation**. Il est intéressant de voir que le choix du **moteur Mitsubishi**, configuré aussi en régime fixe permettrait un **gain de 13% à 15% en pélagique**, pour finalement un **gain similaire au moteur ABC pour le chalut de fond**. Ceci s'explique par le fait que dans le cas de la pêche au chalut de fond, un couple plus important est demandé en moyenne au moteur. Or, le moteur ABC a un meilleur rendement dans ces conditions, il est plus approprié pour ce type de pêche. Le moteur Mitsubishi est plus performant sur des charges plus faibles, et le rend donc plus approprié pour la pêche au pélagique – les gains de consommation présentent un facteur deux comparativement au moteur ABC.

2. Analyse des résultats en Mode 2 et 3

Sur la base du moteur Mitsubishi, on observe que **la mise en place d'une loi de conjugaison** (mode 2, *i.e.* le régime moteur est autorisée à varier) permet un gain de consommation de 18% à 8.5% comparé au moteur ABC actuel à régime fixe, et génériquement cette loi de conjugaison **apporte un gain d'un peu de 2% de consommation** pour un même moteur pris à un **régime fixe** choisi de manière optimale. Ceci est valable quel que soit le type de pêche considéré. Notons que cette loi de conjugaison apporte finalement légèrement plus qu'une hybridation du moteur (neuf) contraint à fonctionner à régime constant (mode 3). Cet état de fait mène surtout à la conclusion que **la mise en œuvre d'une architecture hybride, sans s'autoriser à faire varier le régime moteur et donc le régime d'hélice n'a pas d'intérêt.**

3. Analyse des résultats en Mode 4

Finalement, l'avant dernière colonne résume les gains potentiels que l'on peut espérer avec une architecture hybride parallèle valorisée car s'autorisant les variations du régime moteur ; finalement on peut dire que l'on somme les gains relatifs de la loi de conjugaison et de l'hybridation, et **au final, comparé à la mise en place d'un moteur neuf à régime fixe, on gagne en moyenne 4% de consommation.**

Nous rappellerons les limitations et précautions à prendre à la lecture de ses résultats par la suite ; mais soulignons dès à présent que les résultats obtenus pour les architectures hybrides (Modes 3 et 4) ont été obtenus avec une loi de gestion énergétique (l'EMC) certainement perfectible. Afin de prendre en considération cela, on présente les gains de consommation potentiels dans la dernière colonne du mode 4, obtenus en émulant un comportement « parfait » de l'EMC qui réalise du « pic shaving » ; les sollicitations dynamiques de propulsion, liées à la houle, sont entièrement « gommées » par le moteur électrique seul, permettant au moteur thermique de rester sur des points de fonctionnement à « haut » rendement. Ces résultats sont peut-être optimistes, mais on peut ainsi espérer des **gains de consommation presque doublés comparativement à un simple changement du moteur** par le Mitsubishi neuf, à régime fixe (Mode 1).

4. Gains moyens fonction des activités de pêche

Les 3 dernières lignes du Tableau 9, complété par le Tableau 10, propose une analyse de gain de consommation en fonction de la répartition du temps consacré aux différents types de pêche. Cela permet de moduler les gains notamment vis-à-vis du temps passé à la pêche au chalut de fond, qui s'avère moins sensible tout d'abord au choix du moteur Mitsubishi.

L'apport intrinsèque estimé des technologies par rapport à un moteur neuf à régime fixe (avec la coque ; le réducteur et l'hélice du Naoned) sont :

- Loi de conjugaison: 2 à 3%
- l'hybridation parallèle: 12 à 14%

Apport intrinsèque des technologies : Comparatif à iso-moteur thermique, iso-hélice et iso-réducteur (ratio)

Gains relatifs dans le cas d'un navire neuf - Comparatif Technologique avec pour référence Moteur Mitsubishi Neuf à Régime Constant		Intérêt de la Loi de conjugaison (Mode 2 vs Mode 1)	Intérêt de l'hybridation "Peak-Shaving" (Mode 4 "Peak Shaving" vs Mode 1)
Scénario de pêche	Pélagique thon	3%	14%
	Pélagique merlu	3%	14%
	Fond	2%	12%

5. Potentiels d'optimisation

- **un co-dimensionnement de la chaîne propulsive globale:** choix du ratio du réducteur, du moteur thermique et de l'hélice via un plan d'expérience (DoE) sur une gamme de composants plus large, permettant l'optimisation de la composition de la chaîne propulsif pondéré sur les scénarios grâce à la plateforme EcoBoatTwin
- **le choix de moteurs thermiques moins dynamiques mais plus efficaces;** dans le cas d'une hybridation parallèle, la dynamique étant assurée par le moteur électrique
- l'intégration de **machine learning** pour adapter dynamiquement les points de fonctionnement en navigation.

6. Prise de recul sur ces premiers chiffres

Les tendances ainsi obtenues, notamment les gains relatifs entre les modes 2, 3 et 4 comparés au mode 1 (rénovation du moteur configuré toujours à régime fixe), sont certainement réalistes, voire peut-être pessimiste. En effet, il faut garder en tête que notamment deux modifications seraient à réaliser pour affiner et améliorer les résultats obtenus :

- Le paramétrage de la loi d'hybridation (EMC) est certainement perfectible ; la version actuelle a le mérite de fonctionner pour toutes les configurations matérielles choisies, mais en pratique une telle loi ECMS est normalement reréglée afin d'optimiser au mieux le set matériel choisi.
- Le choix des rapports de réduction a été uniquement fait sur les deux critères suivants ; conserver pour les modes à régime fixe le même régime d'hélice que sur le Naoned à l'état actuel, et « caler » les moteurs thermiques grossièrement dans le régime permettant de passer pour certaines valeurs de couples à son rendement maximal. Il faudrait chercher la paire de rapport de réduction par optimisation.

7. Gains de consommation avec l'utilisation du chalut optimisé

Tableau 11. Estimation des gains de consommation obtenus avec le chalut de fond optimisé - pour toutes les configurations de motorisation.

Consommations simulées						
Dans tous les cas : état de la mer 4						
Gains de consommation (%) par rapport au moteur ABC actuel (usagé)						
Mode 1 (Diesel, régime constant)		Mode 2 (Diesel, régime variable)		Mode 3 (Hybride, régime constant)	Mode 4 (Hybride, régime variable)	Mode 4 - "Peak Shaving" (Hybride, régime variable)
Moteur ABC		Moteur Mitsubishi				
Actuel (référence)	Neuf	nm = 1300 rpm Rm = 5,103	nm = [1200rpm, 1500rpm] Rm = 5,103	Hybride nm = 1300 rpm Rm = 5,103 / Rme = 6,608 Bosch EMS1 16J20 Lehmann_AN2S106	Hybride nm = [1200rpm, 1500rpm] Rm = 5,103 / Rme = 6,608 Bosch EMS1 16J20 Lehmann_AN2S106	Hybride nm = [1200rpm, 1500rpm] Rm = 5,103 / Rme = 6,608 Bosch EMS1 16J20 Lehmann_AN2S106
Gains de consommation (%) passage chalut de fond / chalut de fond optimisé						
Fond - conso (L)	633,2	593,7	592,4	579,8	587	571,9
Fond Optimisé - conso (L)	605,4	563,9	559	547,9	554,5	540,1
Gain conso (%)	4,4	5,0	5,6	5,5	5,5	5,6

En complément de cette analyse sur les différents rétrofits possibles sur le Naoned, des analyses de consommation ont aussi été réalisées en considérant l'impact de l'optimisation du chalut. Seul le cas du chalut de fond a été traité ; les résultats obtenus sont visibles dans le Tableau 11. **Concrètement, le gain de consommation est globalement le même quelle que soit la nature de la motorisation ; on arrive à un gain de 5% de consommation avec le chalut optimisé**, ce qui est comparable, dans le contexte spécifique de ce type de pêche, à la mise en place d'un moteur neuf.

5. Apports méthodologiques innovants du projet HYBA

Le projet HYBA se distingue par l'introduction de **méthodologies avancées issues de l'automobile** adaptées à l'environnement maritime :

- **Approche Hamiltonienne** pour la gestion d'énergie embarquée (EMS),
- **Cartographie des rendements moteurs (ICE)** et hélice à pas variable,
- **Modélisation dynamique du comportement du navire sous houle** (fluctuations de couple analysées en fréquence),
- **Définition de scénarios de navigation personnalisables** à partir de données réelles
- **Méthode de calibration expérimentale des coefficients de résistance à l'avancement.**

Ces travaux posent les bases d'une **hybridation raisonnée**, tenant compte de la réalité opérationnelle, des profils de mission et des capacités de rétrofit.

6. Intégration des modèles dans la plateforme EcoBoatTwin

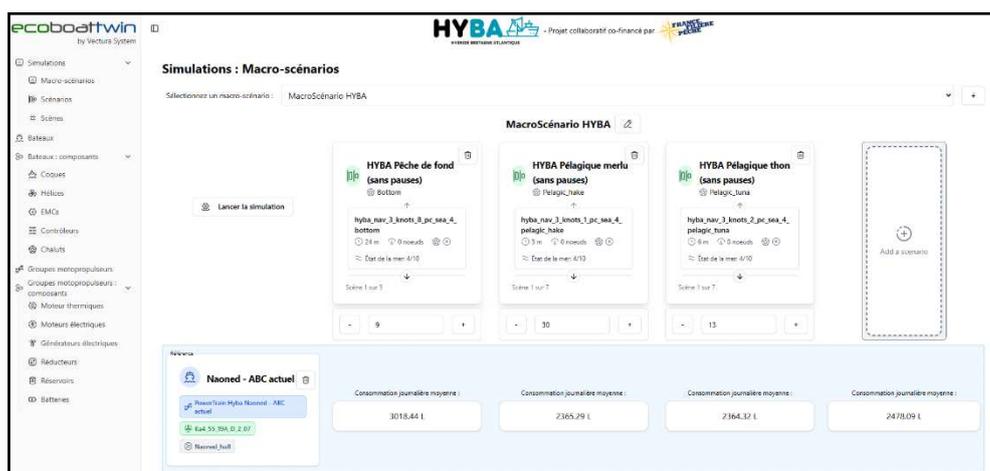
Les modèles ont été intégrés dans la plateforme **EcoBoatTwin**, conçue comme un **jumeau numérique Saas** permettant de simuler le comportement énergétique d'un navire en condition réelle.

Ce jumeau inclut :

- un modèle énergétique multiphysique (M1 / M2),
- un moteur d'optimisation (EMS),
- une interface web pour la sélection de scénarios standard ou personnalisés,
- une base de données de capteurs et d'essais à terre.

L'utilisateur peut ainsi :

- charger un scénario de mission (navigation, pêche au thon, au merlu...),
- tester des configurations hybrides alternatives,
- visualiser les consommations attendues et estimer les gains.



11. WP-C – Architecture Navale : Étude de stabilité et d’architecture navale

1. Analyse des impacts de l’hybridation sur la stabilité et l’architecture du navire

Dans le cadre de la réglementation maritime, les navires doivent se conformer aux divisions qui leur sont spécifiquement applicables. Pour le projet HYBA, c’est la Division 226 (en date du 08/09/2021) qui s’applique, relative aux *navires de pêche d’une longueur égale ou supérieure à 12 mètres et inférieure à 24 mètres*.

Selon l’article 226-2.03 de cette division, relatif à la stabilité : « Les navires doivent être conçus et construits de manière à satisfaire aux prescriptions du chapitre 211-2 ». La Division 211, consacrée à la stabilité des navires, définit les différents critères que tout navire doit respecter pour obtenir un titre de navigation.

Dans le cadre d’un projet de modification, notamment en cas d’hybridation, il est indispensable de réaliser une étude de stabilité prévisionnelle afin de s’assurer que le navire pourra continuer à satisfaire aux exigences réglementaires malgré les changements apportés à sa structure ou à son équipement.

L’étude de stabilité réalisée dans ce projet a donc permis d’évaluer l’impact des modifications retenues sur la stabilité globale du navire.

a. Détermination du navire lège

Dans un premier temps, nous avons identifié et soustrait les différents éléments qui seront retirés dans le cadre des modifications du système de propulsion. Pour ce faire, un devis de poids a été réalisé : il s’agit d’un calcul permettant de retrancher les masses des éléments concernés, en tenant compte de leur position précise à bord. L’objectif est d’obtenir la masse totale ainsi que la position du centre de gravité du navire une fois ces éléments supprimés.

La réalisation de ce calcul a nécessité la connaissance précise des masses et emplacements de chaque composant retiré.

Dans un second temps, nous avons effectué l’opération inverse, en ajoutant tous les nouveaux éléments qui seront installés à bord dans le cadre du projet d’hybridation.

1413 - hyba

DESIGNATION	MASSE	D/OH	Mt/OH	D/CO	Mt/CO	D/Axe	MT/Axe
	t	m	t.m	m	t.m	m	t.m
Navire lège	205,970	3,110	640,567	8,463	1743,124	0,000	0,000
TOTAL STRUCTURE	0,617	1,852	1,142	3,621	2,232	0,000	0,000
TOTAL AMGT SOUS PONT ajouté	8,467	2,083	17,635	4,276	36,207	0,000	0,000
TOTAL AMGT SOUS PONT retiré	12,494	1,754	21,914	6,875	85,893	0,000	0,000
TOTAL ISOLATION VAIGRAGE	0,629	3,468	2,181	0,122	0,077	0,000	0,000
TOTAL TUYAUTAGE	0,170	2,619	0,446	1,917	0,327	0,000	0,000
NAVIRE LEGE PREVISIONNEL	203,359	3,147	640,057	8,340	1696,074	0,000	0,000

À l'issue de ce devis de poids, nous obtenons la nouvelle masse du navire ainsi que la position actualisée de son centre de gravité, prenant en compte l'ensemble des modifications. Ce devis est une étape cruciale : aucun élément ne doit être omis ou positionné de manière approximative. En effet, chaque kilogramme et chaque centimètre de positionnement peuvent influencer significativement le résultat final.

Nous obtenons ainsi les caractéristiques du **navire lège**.

Le **navire lège** désigne un navire en configuration de base, dont la construction est achevée et équipé de tous les dispositifs nécessaires à la navigation, à la propulsion et à l'exploitation, à l'exception du matériel de pêche mobile et de tout liquide en circuit. On parle ici de « navire lège armé avec fluides ». Sont donc exclus du déplacement lège : les captures, le matériel de pêche mobile, les combustibles (y compris celui de la caisse journalière), l'eau douce, ainsi que les provisions de bord, l'équipage et leurs effets personnels.

b. Détermination des cas de chargement

Afin de pouvoir effectuer les calculs de stabilité du navire en conditions d'exploitation, il est nécessaire de déterminer la masse et la position du centre de gravité dans différents états de chargement.

Pour cela, quatre cas de chargement ont été définis, couvrant les deux modes d'exploitation du navire : le **chalutage de fond** et la **senne danoise**. Ces cas représentent les configurations typiques que le navire peut rencontrer au cours de ses missions, en fonction du niveau de chargement des soutes, du matériel embarqué, des captures, et des consommables (carburant, eau douce, etc.).

Les cas de chargement ont été établis selon les prescriptions de la réglementation en vigueur.

Cas de chargement N°1 senne danoise
98% d'approvisionnement, aucune capture

DESIGNATION	POIDS	D/0H	MT/0H	D/CO	MT/CO
Navire léger	203.359	3.147	639.970773	8.340	1896.014060
Matériel de réserve magasin	1.000	5.000	5.000000	18.800	18.800000
2 chaluts 1,75t	3.500	7.465	28.127500	0.565	1.977500
2 panneaux	1.600	4.000	6.400000	-1.500	-2.400000
2 panneaux pelagique	0.200	6.000	1.200000	-1.500	-0.300000
Funes 2x400m e 14	0.520	5.075	2.639000	15.820	8.226400
Funes 2x550m e 22	2.420	5.075	12.281500	15.820	38.264400
Senne danoise	5.500	5.014	27.577000	-3.765	20.707500
Equipage 6 + effet personnel	0.800	4.800	3.840000	9.000	7.200000
Vivre	0.280	4.400	1.232000	9.650	2.702000
GO fr 10-18 SB	5.435	1.059	5.755665	7.325	39.811375
GO fr 10-18 PS	5.435	1.059	5.755665	7.325	39.811375
GO fr 19-27 SB	5.675	0.801	4.545675	11.514	65.341950
GO fr 19-27 PS	5.675	0.801	4.545675	11.514	65.341950
Go day tank SB	0.917	3.837	3.518529	7.120	6.529040
FW fr 34-37	9.662	2.889	27.913518	17.808	172.060898
FW fr 37-41	2.786	3.821	8.734806	19.027	43.495722
EO fr 8-9 PS	0.638	3.031	1.933778	4.260	2.717860
Glace cale	0.000				
Capture en cale					
Caisses 1266 x 3,5kg	4.431	2.450	10.855950	13.000	57.603000
Pontée	8.120	4.400	35.728000	0.700	5.684000
TOTAUX :	267.453	3.124	835.555034	8.561	2289.609048

Effets des carènes liquides

Gas oil	18,55
ED	7,16
Huile	0,04
TOTAL	25,74

Exemple : cas de chargement N°1 de l'exploitation scène danoise.

2. Validation technique des solutions proposées

Dans le cadre du projet d'hybridation du navire, la motorisation est entièrement repensée. L'ancien système propulsif est démonté afin d'être remplacé par un ensemble modernisé et compatible avec les exigences de l'hybridation.

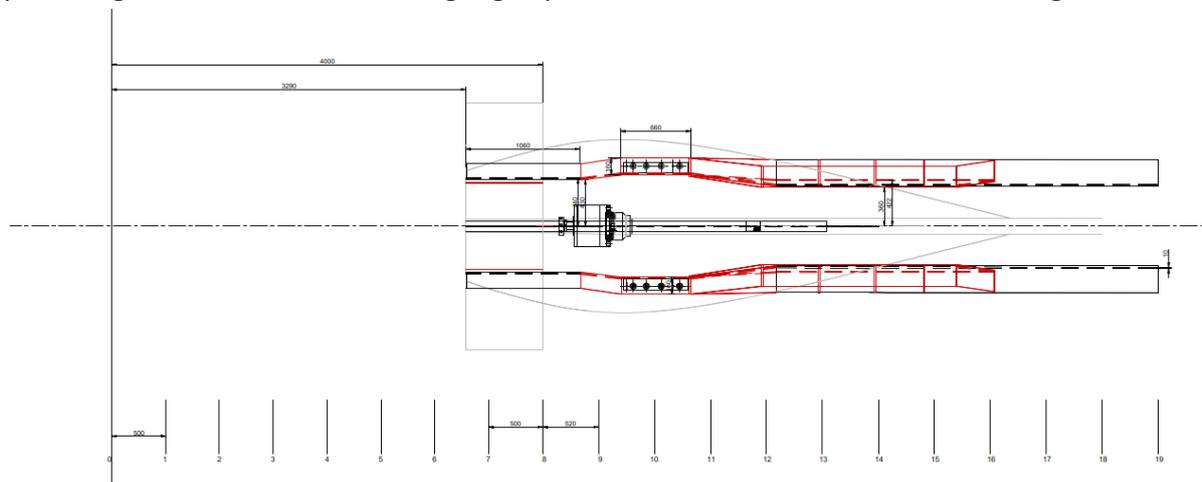
La modification de la propulsion nécessite l'adaptation des plans de montage du moteur et du réducteur, de manière à aligner parfaitement ce dernier avec la ligne d'arbre, qui, elle, reste inchangée.

Par ailleurs, pour assurer le bon fonctionnement du moteur électrique, il est indispensable d'intégrer des batteries ainsi que les différents équipements associés.

a. Implantation du réducteur

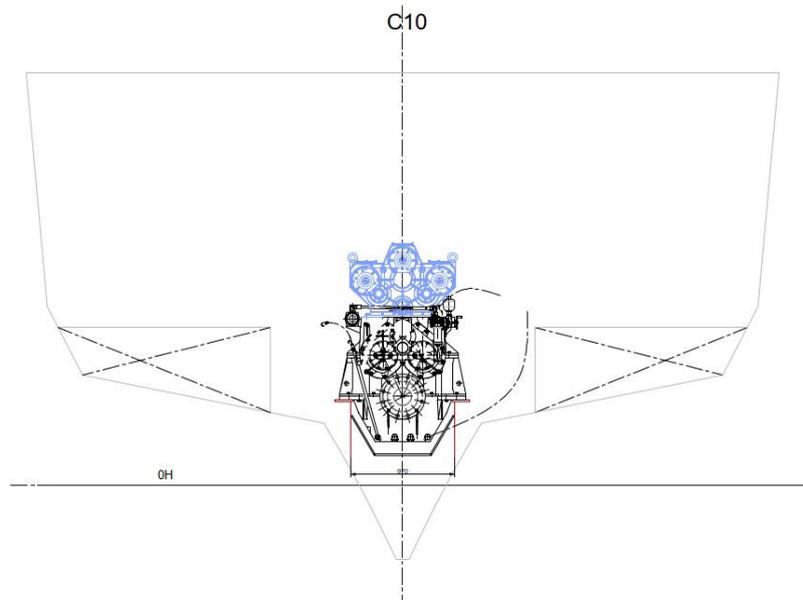
Pour intégrer le nouveau réducteur, nous sommes partis du plan de la ligne d'arbre et du plan de structure machine. Nous avons d'abord positionné le réducteur en l'alignant avec le tourteau d'accouplement de la ligne d'arbre, puis nous l'avons correctement aligné avec l'axe de cette dernière.

Les carlingues du réducteur ont ensuite été adaptées aux nouveaux plans de pose. Un espace a été volontairement conservé entre les carlingues et le réducteur afin de permettre un calage précis, garantissant ainsi un lignage parfait entre le réducteur et la ligne d'arbre.



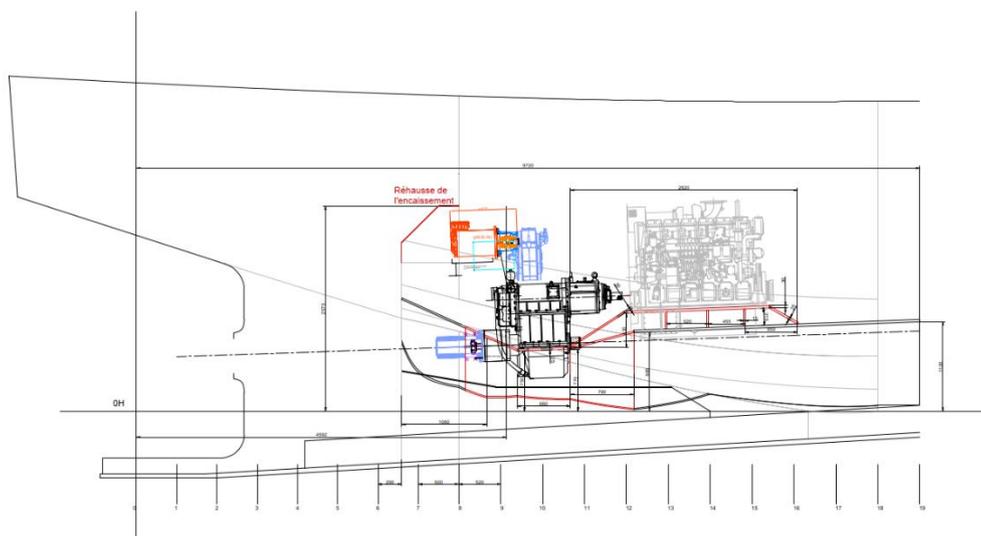
Nous avons également vérifié qu'aucun élément existant n'entraîne en conflit avec l'implantation du nouveau réducteur.

Par la suite, nous avons étudié les différentes solutions proposées par MASSON, le fournisseur du réducteur, et avons retenu la solution « W7400 NR EW avec PTI + coupleur » comprenant un réducteur équipé d'un entre PTO avec 3 entré. Cette configuration permet l'intégration du moteur électrique ainsi que des deux pompes hydrauliques nécessaires au fonctionnement des équipements de navigation et de pêche. De plus, cette solution place le moteur électrique plus haut, facilitant ainsi l'intégration et la maintenance de l'ensemble des modèles de moteurs électriques envisagés dans le cadre du projet.



b. Implantation du moteur électrique

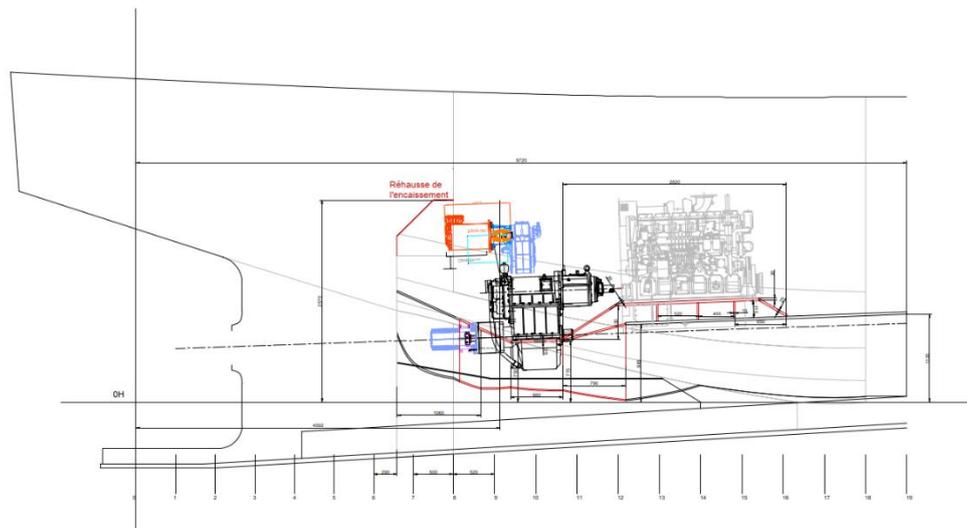
Le moteur électrique est installé à l'entrée centrale de la prise de force (PTO). En raison de l'encombrement du moteur de 100 kW, il est nécessaire de créer un encaissement. Cela permet non seulement de dégager l'espace requis pour intégrer la propulsion électrique, mais aussi d'en faciliter la maintenance de ce dernier ainsi que celle du réducteur.



c. Implantation du moteur

Le nouveau moteur a été intégré selon une démarche similaire à celle utilisée pour le réducteur. Il a été positionné en fonction de l'accouplement moteur/réducteur, qui permet de désolidariser le moteur de la ligne propulsive.

Le moteur est installé sur un châssis servant d'interface entre ses supports et les carlingues d'origine. Ce châssis permet d'assurer un lignage précis avec la sortie du nouveau réducteur. Il a été conçu de manière à reprendre les efforts mécaniques du moteur sans nécessiter de modifications des carlingues existantes, ce qui permet de limiter les coûts d'adaptation liés à l'implantation du nouveau moteur.



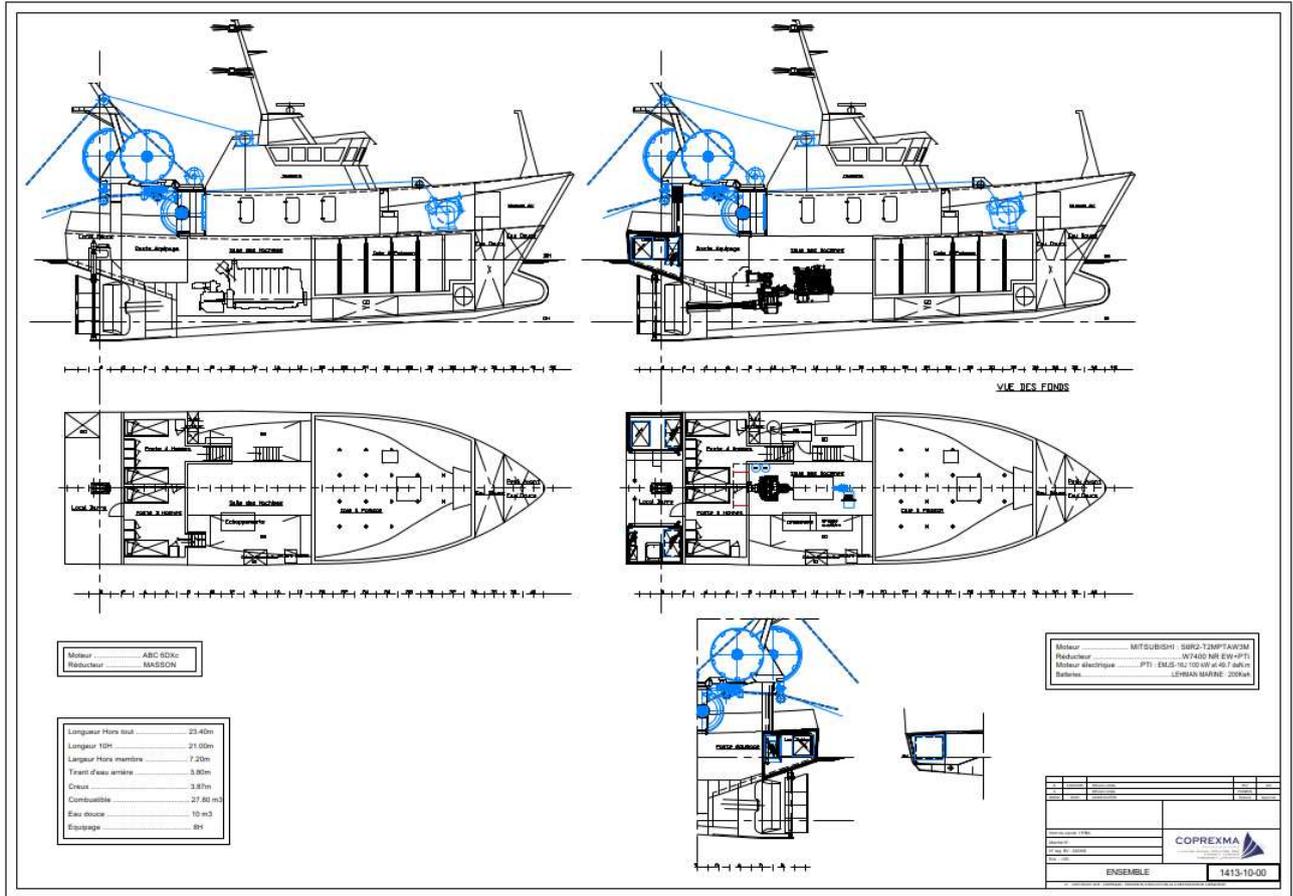
d. Implantation du local batterie

Le fonctionnement du moteur électrique nécessite une source d'énergie, stockée dans des batteries. Ces batteries doivent être installées dans un local dédié, étanche aux intempéries, ventilé et équipé d'un système d'extinction autonome.

Afin de garantir une autonomie suffisante en mode hybride, nous avons évalué deux configurations proposées : une capacité de 100 kW et une autre de 200 kW. Nous avons retenu la solution à 200 kW, car elle offre une plus grande autonomie et permet une utilisation du mode hybride sur une plage de fonctionnement plus étendue.

Pour intégrer ces batteries, nous avons choisi d'aménager le local barre. Des cloisons ont été ajoutées pour créer un espace spécifique dédié au stockage des batteries et de leurs équipements annexes. Ce local comprend deux racks de batteries de 100 kW chacun, une armoire de commande, un gestionnaire de puissance, un convertisseur, un système de ventilation, ainsi qu'un système d'extinction fixe.

Enfin, ce local doit être isolé conformément aux exigences de sécurité incendie afin de limiter les risques en cas de défaillance thermique ou électrique.



Plan d'ensemble du navire NAONED à gauche et le Plan d'ensemble du projet HYBA à droite

En résumé, l'ensemble de la motorisation a été repensé afin d'intégrer le nouveau système propulsif tout en optimisant les coûts et en maintenant une accessibilité et une simplicité de maintenance pour l'ensemble des éléments de la ligne propulsive.

12. WP-C - Choix du moteur thermique pour l'hybridation – Mitsubishi S6R2

Dans le cadre de l'hybridation du chalutier *Naoned*, un travail de dimensionnement a permis de comparer plusieurs motorisations thermiques, en tenant compte de leur compatibilité technique, de leur rendement, de leur régulation et de leur conformité aux normes environnementales. Le moteur actuellement en place (ABC semi-rapide 626 kW à 750 RPM) présente des limitations en termes de rendement ($\approx 36\%$ usagé, 40% neuf) et de capacité d'intégration dans une architecture hybride.



Le moteur thermique retenu pour l'architecture hybride projetée est un **Mitsubishi S6R2**, capable de délivrer jusqu'à **691 kW à 1406 RPM**.

Ce moteur a été choisi pour plusieurs raisons :

- **Compatibilité avec les hélices à pas variable existantes**, avec adaptation du réducteur (rapport 5,103),
- **Rendement moyen supérieur** (Courbe de rendement plus « plate » sur la plage de régime) et plage d'optimisation plus large,
- **Capacité de régulation électronique** permettant l'intégration d'une **loi de conjugaison** moteur/hélice,
- **Conformité potentielle à la norme IMO Tier III** en couplage avec un SCR (Selective Catalytic Reduction) et AdBlue,
- **Modularité du pilotage énergétique** en lien avec l'EMS (Energy Management System) développé dans EcoBoatTwin.
- **Homogénéité avec le reste de la flotte APAK**



S6R2-T2MPTK
324 - 610 kW | PROPULSION
IMO TIER II

MITSUBISHI MARINE ENGINE

RELIABLE MECHANICAL ENGINE



ENGINE DATA	
Engine model	S6R2-T2MPTK
Cylinder configuration	6 in-line
Total displacement	29.96
Bore x stroke (mm)	170 x 220
Flywheel and housing	SAE 18 / SAE 0
Compression ratio	14.0:1
Dry weight (kg)	2960

Method of operation	4-stroke, water-cooled diesel engine, with direct-injection, turbocharger and air-cooler
Cooling method	separate high and low temperature cooling circuit; charge air cooler directly cooled by sea water (intercooler)

RATING ^{1,2}							
Rating	UCD	UCD	UCD	UCD	UCD	HD	MD
Output (kW)	324	380	395	423	480	530	610
Output (bhp)	435	510	530	567	644	711	818
Engine speed (rpm)	1350	1350	1350	1350	1350	1400	1500
Emissions	IMO Tier II						

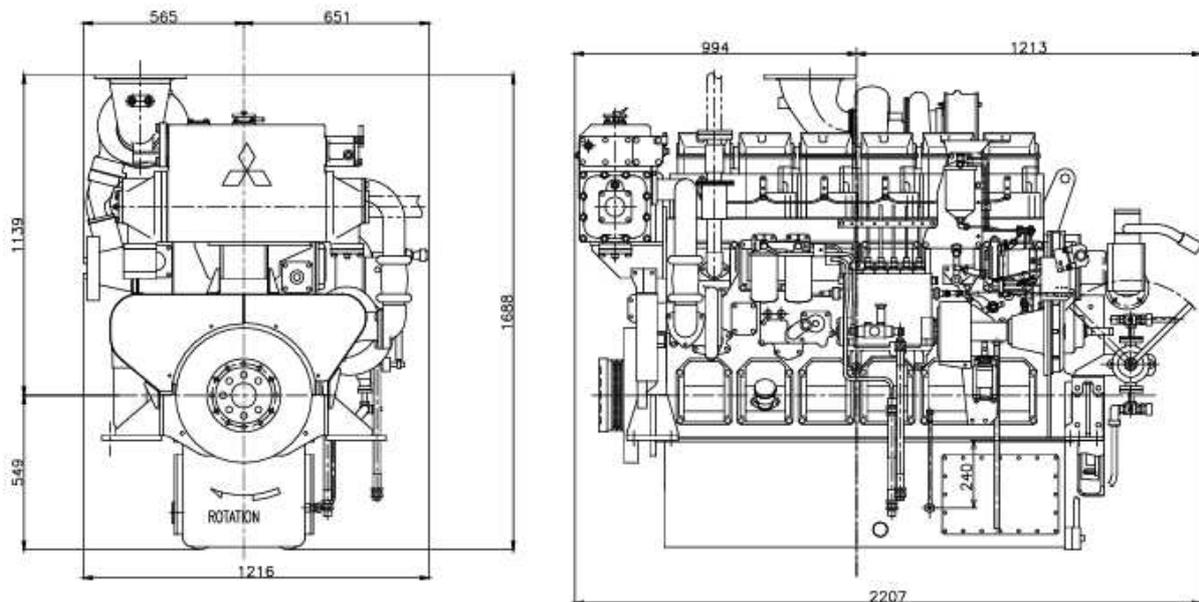
¹ For rating definitions, please see our website.

² Atmospheric condition: barometric pressure: 100kPa, ambient temperature: 298K, relative humidity: 30%.

Des simulations réalisées sur plusieurs scénarios opérationnels du *Naoned* ont confirmé que ce moteur permet de **réduire significativement la consommation**, en particulier dans les phases à charge partielle. Par ailleurs, l'option d'un fonctionnement à régime variable permet de rapprocher en continu le point de fonctionnement du moteur de sa **zone de consommation spécifique optimale (CSE)**.

Enfin, le Mitsubishi S6R2 présente une bonne **intégrabilité dans la cale moteur**, avec des adaptations minimales des volumes existants et des interfaces mécaniques, ce qui en fait une solution techniquement viable et économiquement rationnelle pour le rétrofit hybride du navire.

DIMENSIONS



13. WP-C - Réducteur Masson hybridisé

1. Objectifs

- Analyser les besoins liés à l'hybridation de la propulsion du chalutier Naoned.
- Sélectionner un réducteur adapté à une double motorisation (thermique/électrique).
- Définir les caractéristiques techniques et les interfaces d'intégration.
- Évaluer l'impact sur la chaîne de propulsion existante.

2. Démarche et Travaux Réalisés

a. Analyse des besoins et contraintes techniques

- **Puissance moteur thermique** : 900 Cv (662 kW) à 750 rpm.
- **Rapport de réduction optimal** déterminé : 2,953.
- **Diamètre hélice imposé** : 2070 mm (tuyère 2100 mm).
- **Régime hélice** : 254 rpm.
- **Limitation de la ligne d'arbre existante** : type HPV 804, 3,3 kW/rpm.

b. Recherche et comparaison des solutions de réducteur

- Constitution d'une base de données des performances des réducteurs embrayeurs et des hélices à pas variable.
- Calculs et essais de traction pour valider la méthodologie et les choix techniques.
- Corrélation entre le pas d'hélice et les commandes hydrauliques (relevé tiller, transformation course vérin → angle du pas → pas d'hélice).

c. Étude des solutions d'hybridation en prise en compte de l'intégration de la machine électrique

Deux solutions principales ont été étudiées prenant en compte différents critères dont l'intégration de la machine électrique,

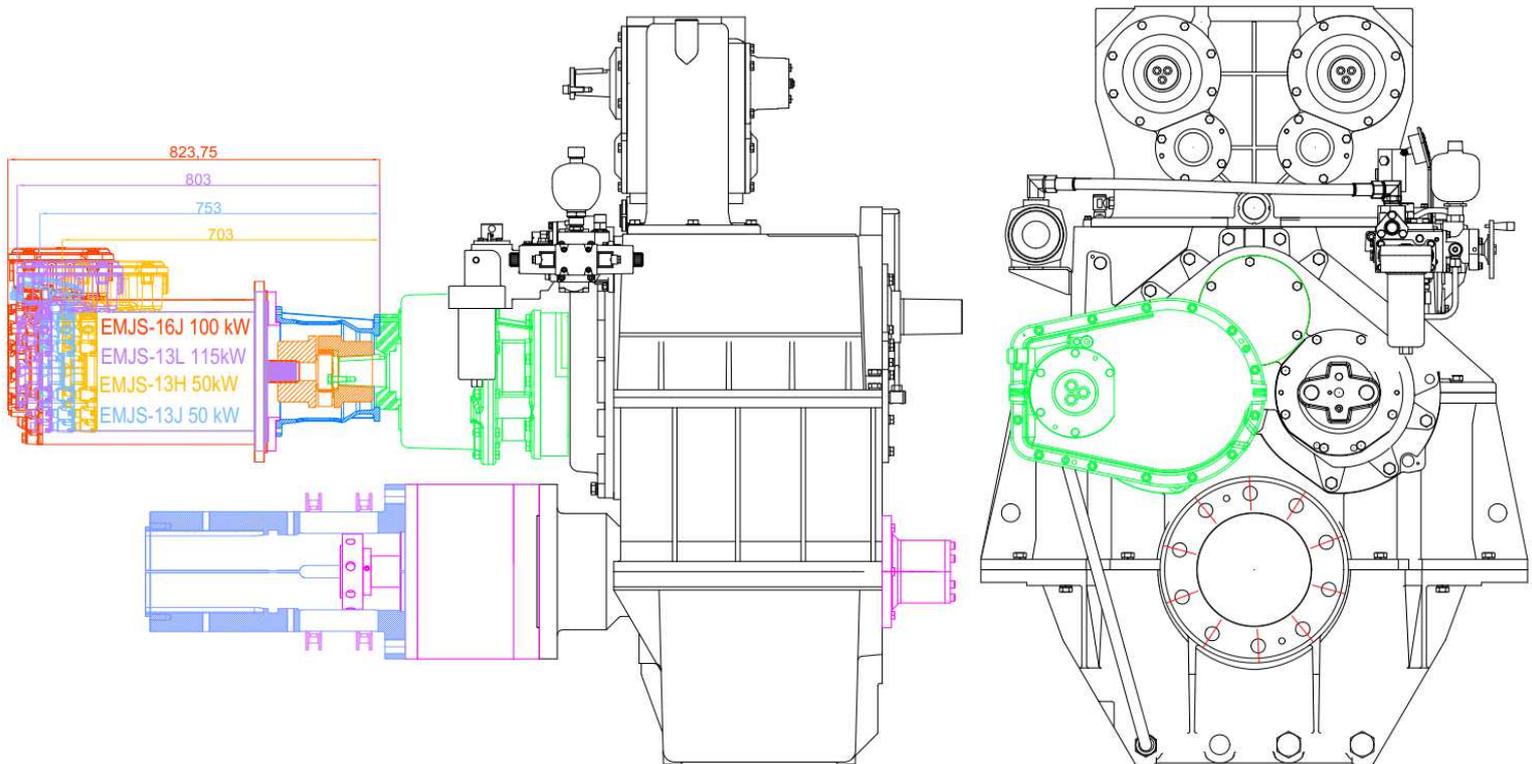
Le point névralgique du projet d'hybridation du NAONED est bien évidemment l'utilisation et l'intégration d'une machine électrique assistant le moteur thermique sur des points précis de fonctionnement afin de pouvoir réduire la consommation de carburant.

Les différents modes de fonctionnement de l'hybridation sont les suivantes :

- Propulsion thermique seule.
- Propulsion électrique seule.
- Propulsion thermique + électrique.

Dans ce but, MASSON MARINE a décidé de proposer une solution « clé en main » afin de pouvoir intégrer la machine électrique.

Cette solution est d'intégrer une PTI (Power Take In) afin d'ajouter une prise de mouvement auxiliaire directement intégrée au réducteur.



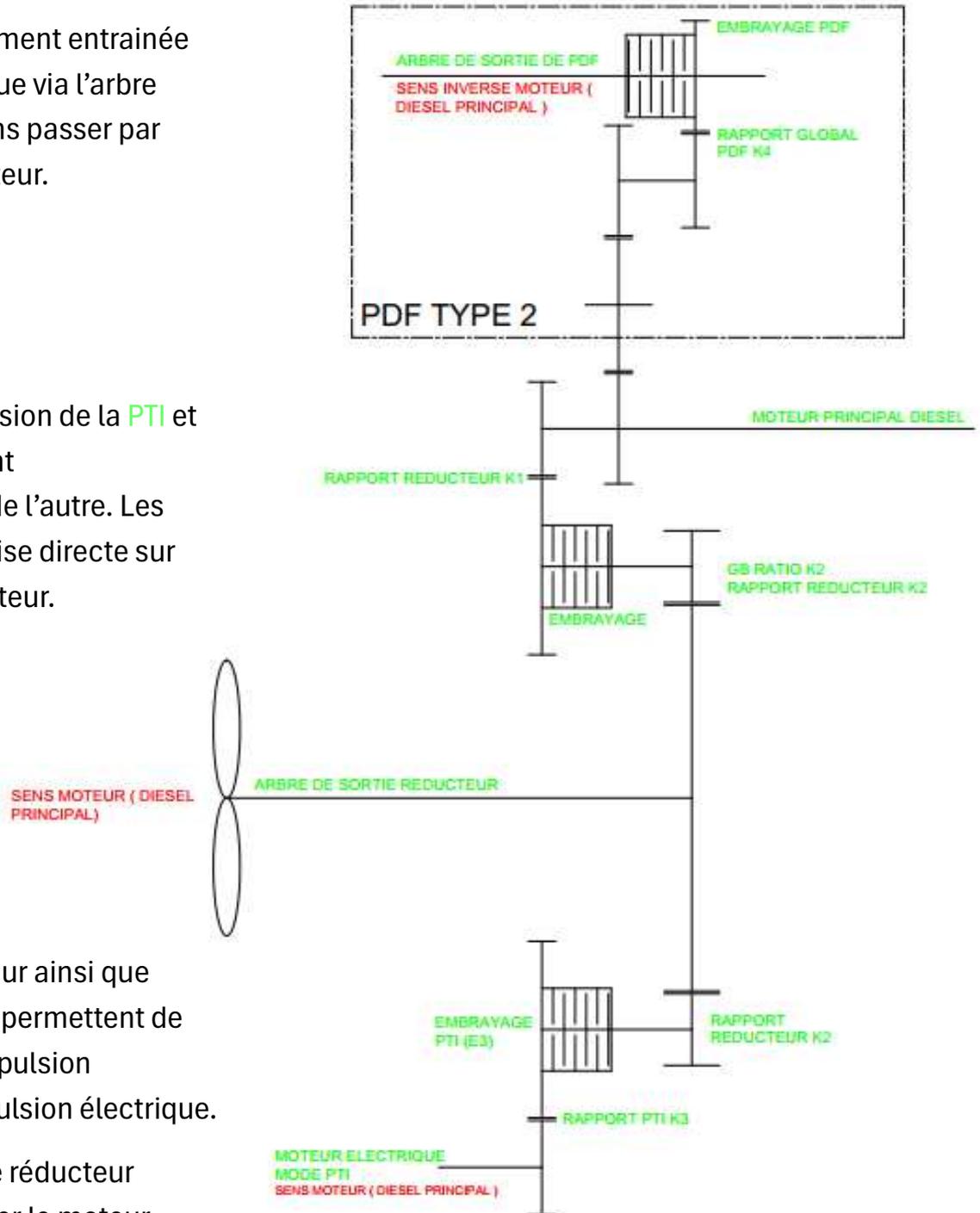
L'architecture de cette première solution permet de réaliser les différents modes de fonctionnement demandé tous en ayant un encombrement global contenu, une palette de ratios disponibles permettant d'avoir des vitesses d'entrée PTI différentes afin d'optimiser les performances de la machine électrique.

En effet, la chaîne cinématique du réducteur avec la PTI s'organise de la façon suivante :

SCHEMA CINEMATIQUE

La top **PTO** est directement entraînée par le moteur thermique via l'arbre d'entrée réducteur sans passer par l'embrayage du réducteur.

La chaîne de transmission de la **PTI** et celle du réducteur sont indépendantes l'une de l'autre. Les deux lignes sont en prise directe sur l'arbre de sortie réducteur.



L'embrayage réducteur ainsi que l'embrayage **PTI (E3)** permettent de switcher entre la propulsion thermique et la propulsion électrique.

De plus, l'embrayage réducteur permet de désengager le moteur thermique lors de la propulsion électrique afin d'éviter d'entraîner le moteur thermique via le moteur électrique.

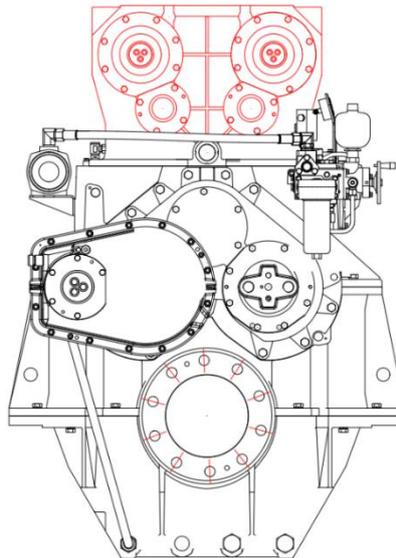
Suite à cela nous avons mis à disposition des autres intervenant du projet H.Y.B.A un tableau récapitulatif des performances et des ratios disponibles du MM W7400 avec cette PTI, ainsi que d'autres réducteurs de la gamme MASSON MARINE.

Modèle	Rapport	performance kW/RPM	vitesse max entrée tr/min	Modèle	Rapport	performance kW/RPM	vitesse max entrée tr/min	Modèle	Rapport	performance kW/RPM	vitesse max entrée tr/min		
MM W1950	4,103	0.210	2800	MM W3850	6,955	0.348	2100	MM W6000	4,477	0.510	1800		
	4,481								5,103				
	4,920								5,755			0,451	2000
	5,727								6,508			0,400	2300
	6,400								7,061			0,368	2600
	7,222								7,674			0,339	2800
7,706	8,704	0,299											
MM W3100	4,034	0.316	2300	MM W4400	4,448	0.54	2100	MM W6400	6,170	0.603	2100		
	4,444								6,461			0,576	
	5,074								7,099			0,523	
	5,560								7,446			0,497	
	6,000								3,296			0,869	1850
MM W3300	6,444	0.296	2200	MM W4000	3,474	0.451	2000	MM W7200	3,780	0.869	1850		
	6,556								3,923			0,399	2300
	6,941								4,258			0,368	2600
	6,444								4,625			0,339	2800
6,842	5,248	0,298											
MM W3450	4,077	0.361	2200	MM W5200	4,962	0.611	2100	MM W7400	4,313	0.811	2100		
	4,583								4,506			0,785	
	4,913								4,926			0,735	
	5,476								5,282			0,700	
	5,850								5,633			0,654	
MM W3700	4,077	0.388	2200	MM W5700	1,976	0.764	1872	MM W7400	4,608	0.869	1850		
	4,583								4,815			0,848	1950
	4,913								5,031			0,864	2000
	5,476								5,258			0,811	
	5,850								5,494			0,785	
									6,006			0,732	
									6,439			0,696	2100
									6,868			0,654	
	7,522	0,603											
	7,877	0,576											
	8,655	0,523											
	9,078	0,497											

PTI		
Entrée pour moteur électrique		
Rapport	performance kW/RPM	vitesse max entrée tr/min
6,608	0,332	2300
7,597	0,289	
9,219	0,238	
10,725	0,204	
13,128	0,167	

Par la suite, différents modèles de machines électriques ont été proposés par le chef du projet H.Y.B.A Il a donc été demandé à MASSON MARINE de regarder la faisabilité d'intégration de chaque modèle de machine électrique. Suite à cela, MASSON MARINE a été de nouveau sollicité afin de regarder la faisabilité d'asservir partiellement ou totalement l'hydraulique attelée sur le réducteur.

En effet, sur la PTO (Power Take Off) supérieur du réducteur sont attelées deux pompes hydrauliques asservissant et pilotant le matériel de pêche.

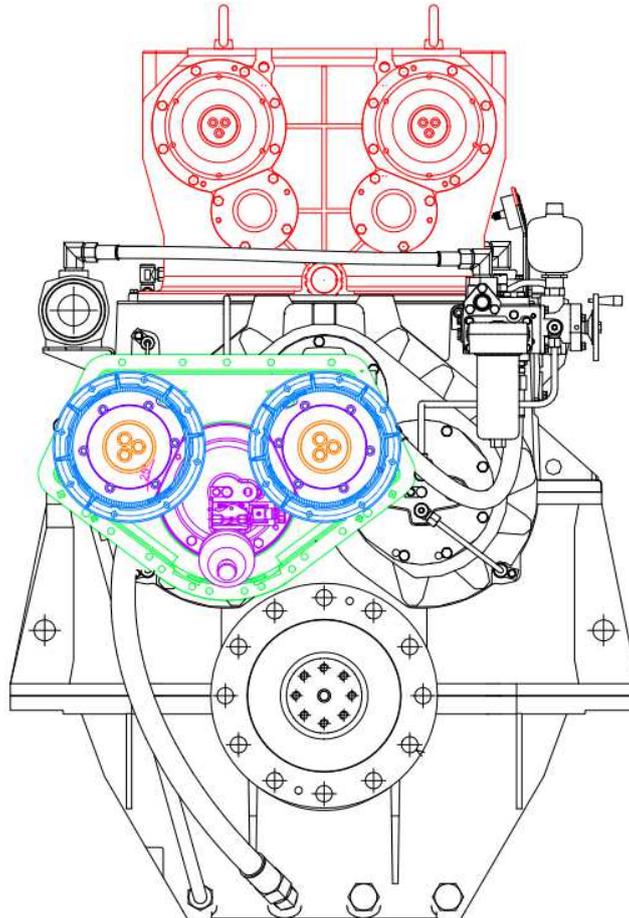


Afin de pouvoir décharger le moteur thermique lors des phases de pêches et de profiter de tous les avantages d'avoir une machine électrique pour la propulsion, MASSON MARINE a proposé 2 solutions distinctes pour l'asservissement hydraulique sur le circuit de propulsion électrique.

d. Asservissement de l'hydraulique sur la propulsion électrique

1. Solution numéro 1 :

La première solution proposée par MASSON MARINE afin d'asservir partiellement le système hydraulique attelé sur le réducteur, n'est d'autre qu'une évolution de la proposition principale.



En effet l'idée est de garder le même type d'intégration que la **PTI** d'origine mais d'y intégrer une sortie supplémentaire afin de pouvoir entrainer un auxiliaire via la machine électrique. Toutefois, on garde la **PTO** afin d'entrainer la seconde pompe hydraulique. Cette solution possède exactement les mêmes ratios que la **PTI** d'origine.

De ce fait avec cette solution nous pouvons aussi garantir les différents modes de fonctionnement à savoir :

- **Mode Propulsion thermique seule :**

Moteur diesel en marche et moteur électrique éteint

→ Embrayage de **PTI (E3)** inactif

→ Embrayage du réducteur (**E1**) actif

- **Mode Propulsion électrique seule :**

Moteur diesel éteint et moteur électrique en marche

- Embrayage de PTI (E3) actif
- Embrayage du réducteur (E1) inactif.

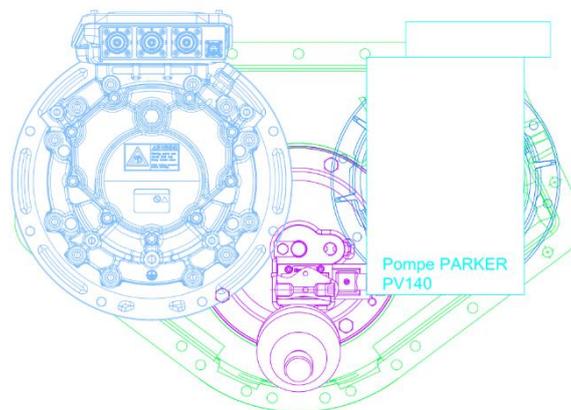
- Mode Propulsion thermique + électrique :

Moteur diesel et électrique en marche

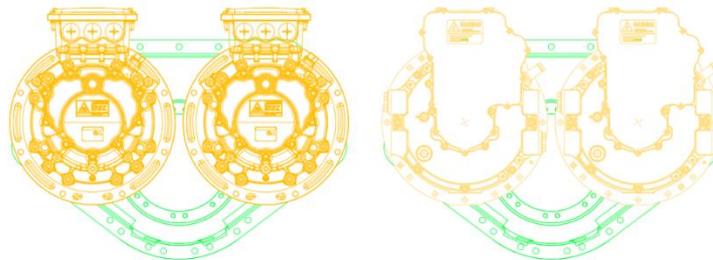
- Embrayage PTI (E3) actif
- Embrayage du réducteur (E1) actif

Les avantages de cette solution sont les suivants :

- Encombrement du réducteur identique à l'encombrement début de projet.
- Hybridation partielle de l'hydraulique (possibilité d'entraîner l'une des pompes hydrauliques).



- Possibilité de mettre 2 moteurs électriques de faible gabarit sur la PTI afin de multiplier la puissance électrique.

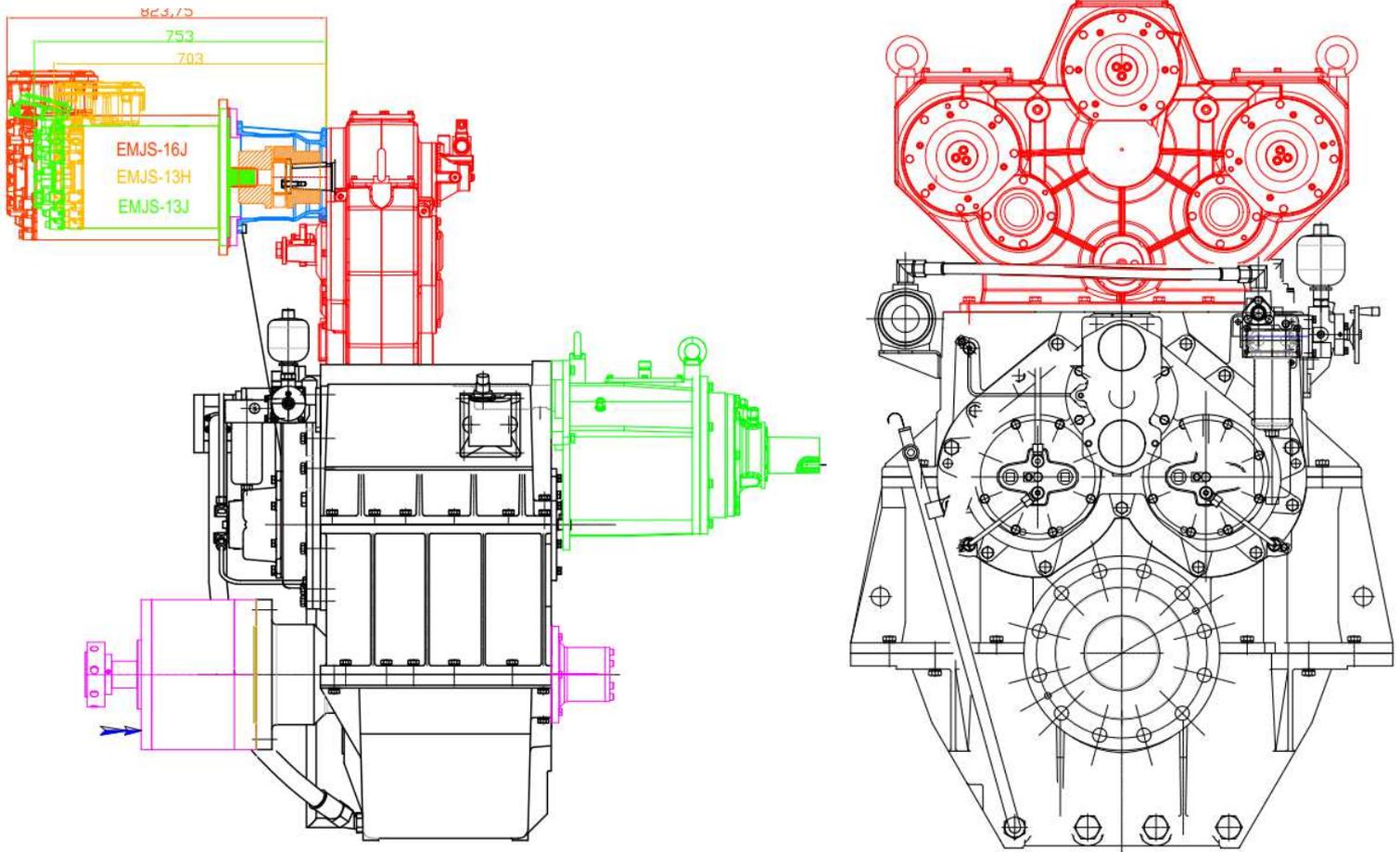


Les inconvénients de cette solution sont les suivants :

- Impossibilité d'asservir les 2 pompes hydrauliques de l'appareil sur la propulsion électrique.
- Impossibilité d'asservir une pompe hydraulique avec le montage double moteur électrique.
- Impossibilité d'asservir une pompe hydraulique auxiliaire en plus de la pompe hydraulique principale.
- Vitesse de sortie maximum de la PTI pour moteur électrique : 2300 rpm (régime intermédiaire).
- 5 ratios disponibles avec la PTI.

2. Solution numéro 2 :

La première solution proposée par MASSON MARINE afin d'asservir partiellement le système hydraulique attelé sur le réducteur, est une refonte de l'intégration hybride du réducteur.



Avec cette solution, la **PTO 2** (deux sorties) est remplacée par une **PTO 3** (trois sorties) afin d'accueillir la machine électrique (utiliser en PTI) ainsi que les 2 pompes hydrauliques. Dans cette configuration nous devons ajouter un « **coupleur** » entre le réducteur et le moteur électrique afin de désengager le moteur thermique lors de la propulsion électrique.

Dans cette configuration nous pouvons garantir les différents modes de fonctionnement demandé tous en ayant un panel de ratio plus développé que la solution numéro 1.

Les différents mode de fonctionnement sont les suivants :

- **Mode Propulsion thermique seule :**

Moteur diesel en marche et moteur électrique éteint.

→ Embrayage PTI (E3) inactif.

→ Embrayage du coupleur (E2) actif.

→ Embrayage du réducteur (E1) actif.

- **Mode Propulsion électrique seule :**

Moteur diesel éteint et moteur électrique en marche.

- Embrayage PTI (E3) actif.
- Embrayage du coupleur (E2) inactif.
- Embrayage du réducteur (E1) actif.

- **Mode Propulsion thermique + électrique :**

Moteur diesel et électrique en marches.

- Embrayage PTI (E3) actif.
- Embrayage du coupleur (E2) actif.
- Embrayage du réducteur (E3) actif.

Les avantages de cette solution sont les suivants :

- Hybridation indépendante de l'hydraulique attelée sur la PTO et possibilité d'ajouter des pompes auxiliaires sur les lignes intermédiaires de la PTO.
- Positionnement du moteur électrique en position central, bâbord ou tribord en fonction des impératifs d'encombrement.
- 195 ratios disponibles avec la PTO 3.
- Vitesse maximum de sortie de la PTO pour moteur électriques : 3000 rpm

Les inconvénients de cette solution sont les suivants :

- Encombrement général du réducteur et du coupleur pour les projets de retrofit, à privilégier pour les constructions de bateau neuf.

e. Sélection de la solution optimale

L'intervention et l'expérience de MASSON MARINE dans le domaine de la propulsion, a permis en partenariat avec les autres intervenant du projet H.Y.B.A d'optimiser au mieux tous les éléments constituant la propulsion du NAONED.

MASSON MARINE a su adapter son matériel, apporter les solutions techniques à la demande, l'exigence et les évolutions du cahier des charges.

Plusieurs solutions techniques ont été présentées, étudiées et analysées. Suite à la dernière réunion technique avec les partenaires du projet, la solution numéro 2 (W7400 + PTO/PTI 3 + coupleur) a été retenue et validée pour sa pertinence et son adaptabilité dans le cas de construction neuves et intégration en cas de retrofit.

Motivations du choix :

- Fiabilité des ensembles mécaniques (technologie éprouvée, catalogue MASSON MARINE).
- Adaptabilité du positionnement du moteur électrique (babord, central, tribord), facilitant l'intégration à bord du Naoned.
- Grande flexibilité des rapports de PTI, permettant de choisir parmi une large gamme de moteurs électriques.
- Vitesse d'entrée élevée acceptée (jusqu'à 3000 tr/min).
- Hybridation indépendante de l'hydraulique attelé à la prise de force.

3. Livrables produits

- **Cahier des charges fonctionnel** du réducteur incluant les contraintes d'intégration et les exigences de performance.
- **Rapport d'analyse comparative** des solutions de réducteur et de leur compatibilité avec l'hybridation.
- **Note de dimensionnement** validant le choix du rapport de réduction et la compatibilité mécanique.
- **Rapport final** du WP avec recommandations pour l'achat et l'intégration.

4. Impacts et recommandations

- **Sécurisation de l'hybridation** grâce à un choix de réducteur éprouvé et flexible.
- **Facilité d'intégration** sur le Naoned, sans modification lourde de la salle des machines.
- **Ouverture à l'évolution de la motorisation électrique** grâce à la flexibilité du PTI.
- **Indépendance hydraulique** assurée pour les équipements auxiliaires.

En conclusion, le WP Réducteur a permis de sélectionner et de valider une solution technique fiable, flexible et adaptée à l'hybridation du chalutier Naoned, tout en sécurisant l'intégration et la performance de la chaîne de propulsion. Ce choix constitue un jalon essentiel pour la réussite du projet HYBA et sa reproductibilité sur d'autres unités de la flotte.

14. WP-C - Choix du Moteur Electrique

Dans le cadre du dimensionnement de l'architecture hybride parallèle du *Naoned*, le choix du **moteur électrique (MEL)** et de son **onduleur associé** a été guidé par les besoins fonctionnels identifiés sur la base :

- des données réelles d'usage (pêche au thon, merlu, navigation côtière),
- des appels de puissance ponctuels observés lors des manœuvres (accélérations, virages, traction),
- des contraintes mécaniques et électriques d'intégration à bord.

1. Rôle du moteur électrique

Le moteur électrique a pour fonction principale :

- de **fournir une puissance complémentaire** lors des pics de couple, sans solliciter excessivement le moteur thermique,
- de permettre un fonctionnement **tout-électrique à faible vitesse**, notamment dans les zones à faibles émissions ou les phases portuaires,
- de **lisser les fluctuations de puissance** pour optimiser le rendement global du système.

2. Choix des fournisseurs

À l'issue de la comparaison entre plusieurs solutions industrielles (Bosch, Hydac, Dana) pour les moteurs électriques, notre choix pour le couplage avec le réducteur Masson, c'est arrêté sur 2 fournisseurs venant du monde OFFROAD/OFF-HIGHWAY :

- ayant une forte expérience de moteurs électriques au standard AUTOMOTIVE
- utilisés dans des conditions sévères de machines mobiles (Machines agricoles, BTP)
- une gamme très large de moteurs permettant d'envisager différentes puissances d'hybridation en fonction des usages

a. les moteurs BOSCH REXROTH et leur gamme e-lion

Pour l'intégration des motorisations électriques eLION dans le cadre de l'hybridation d'un bateau, voici les recommandations techniques issues des échanges avec DINTEC et BOSCH REXROTH:

Rexroth **eLION** solution portfolio
Motor portfolio @ 700V & 65°C

On request

Size	Length	M ₀ [Nm]	M _{0,95} [Nm]	Standard Speed								High Speed					
				4,000 – 6,000 (size dependent)								10,000 – 12,000 (size dependent)					
				n _{nom} rpm		1,000		1,500		2,000		2,500		3,000		4,000	
n _{max} rpm	n _{nom} rpm	P ₅₁ [kW]	M ₅₁ [Nm]	P ₅₁ [kW]	M ₅₁ [Nm]	P ₅₁ [kW]	M ₅₁ [Nm]	P ₅₁ [kW]	M ₅₁ [Nm]	P ₅₁ [kW]	M ₅₁ [Nm]	P ₅₁ [kW]	M ₅₁ [Nm]	P ₅₁ [kW]	M ₅₁ [Nm]		
EMS1-10	F	70	172	7	70	11	71	15	70	18	70	22	70	29	69	39	62
	H	97	229	10	87	15	96	20	95	25	96	30	95	38	92	52	82
	J	123	286	13	122	19	121	26	125	31	120	37	118	48	114	63	100
EMS1-13	L	149	343	16	145	23	145	31	147	38	144	45	143	58	138	74	117
	F	158	335	15	147	22	143	30	145	38	144	45	143	57	136	77	123
	H	218	445	21	202	31	197	41	198	51	195	59	189	77	184	96	152
EMS1-16	J	273	555	27	255	40	254	52	249	63	241	75	238	96	229	112	178
	L	325	665	32	302	47	301	62	296	76	290	89	285	115	274	133	212
	F	393	707	39	372	58	371	77	366	90	346	109	343	133	323	161	241
EMS1-20	H	524	943	51	490	76	483	98	467	114	435	133	423	161	393	212	301
	J	638	1178	63	598	90	572	117	557	134	512	153	500	181	463	251	340
	L	748	1413	74	705	105	667	135	646	141	539	161	512	181	463	251	340
EMS1-20	F	730	1273	72	692	100	636	130	619	144	552	161	512	181	463	251	340
	H	979	1697	96	915	137	871	168	804	176	672	191	612	211	503	281	380
	J	1199	2121	116	1112	164	1045	192	915	208	793	211	612	211	503	281	380
EMS1-20	L	1422	2544	134	1283	192	1221	218	1042	229	874	229	874	229	874	229	874

acc. ECE R85 with starting temperature of 25°C



SAFETY ON BOARD

80A
160A
300A

rexroth
A Bosch Company

29 eLION | Customer Presentation | 29.01.2024 | © Bosch Rexroth AG 2024. All rights reserved, also regarding any disposal, exploitation, reproduction, editing, distribution, as well as in the event of applications for industrial property rights.

1. Solution 50 kW

- **Modèle retenu** : EMS1-13J20
 - Configuration : bobinage optimisé pour 2000 tr/min nominal 13
 - Puissance nominale : 50 kW @ 2000 tr/min
 - Couple nominal : ~254 Nm (selon courbe charge/vitesse)
 - Variante alternative : EMP1-13H20 (version "Puissance" plus compacte)

2. Solution 100 kW

- **Options techniques** :
 1. **EMS1-13L20**
 - Limite maximale de la taille 13 (longueur L)
 - Puissance atteinte : 80 kW @ 2000 tr/min → 94 kW avec réducteur permettant 3000 tr/min
 2. **EMS1-16J20**
 - Alternative compacte (longueur J inférieure au 16L)
 - Couvre 100 kW sur plage 1700-2300 tr/min

b. les moteurs DANA

Pour l'intégration des motorisations électriques DANA dans le cadre de l'hybridation d'un bateau, voici les recommandations techniques issues des échanges avec TORQ & Electric Motion.

1. Solution 50 kW (LD HV800)

• Configuration :

- Puissance nominale : 50 kW entre 1700 et 2500 tr/min 1
- Masse : 82,5 kg (moteur) + 11,5 kg (variateur) 1
- Rendement : > 95 % (selon courbe fournie) 1
- Interfaces mécaniques : arbre mâle ou femelle 1
- Certification : IP69K 1

2. Solution 100 kW (HP HV1000)

• Configuration :

- Puissance nominale : 100 kW entre 1700 et 2500 tr/min 1
- Masse : 116 kg (moteur) + 11,5 kg (variateur) 1
- Rendement : > 93 % (selon courbe fournie) 1
- Interface standard : SAE ICE (arbre mâle)

3. Configuration retenue

À l'issue des simulations et arbitrages techniques, le **choix final** s'est porté sur une machine électrique capable de délivrer environ **100 kW en continu à l'arbre**, associée à un pack batterie dimensionné en cohérence (max 200kWh selon les scénarios : voir chapitre suivant) et un EMS piloté.

Cette puissance a été jugée suffisante pour :

- couvrir l'essentiel des sollicitations transitoires typiques (virage en bœufs, accélération au moment de faire « rentrer la tache de thon »),
- **Peak-Shaving (Limitation du pompage du moteur)** → Couvrir les oscillations de puissance au moteur thermique de **+/-30kW à +/- 50kW a une fréquence rapide** lors des navigations dans la houle, afin de permettre un filtrage / amortissement dynamique des variations moteur pour permettre de minimiser la consommation de carburant
- garantir un fonctionnement portuaire silencieux et sobre,
- maintenir un bon rendement dans la plage utile de fonctionnement.

4. Onduleur et tension d'alimentation

L'onduleur sélectionné fonctionne sous une **tension nominale de 600 V**, afin de limiter l'intensité des courants et d'optimiser les performances électriques. Les critères de choix comprenaient :

- **capacité à délivrer des courants élevés** (>200 A crête),
- **compatibilité avec les signaux de commande du système EMS**,
- **fiabilité maritime** (IP élevé, robustesse environnementale),
- **compacité et facilité de refroidissement**.

Le détail de l'intégration des moteurs électriques est traité dans le chapitre sur le réducteur.

15. WP-C - Choix des Batteries

1. Enjeux de l'hybridation et critères de sélection

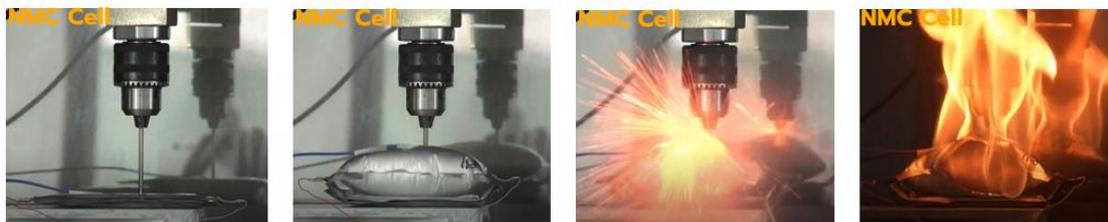
L'hybridation d'un bateau repose sur l'intégration de systèmes de stockage d'énergie capables de répondre à des contraintes maritimes exigeantes : robustesse, sécurité, efficacité énergétique, durée de vie, compacité et simplicité d'intégration. Dans ce contexte, la technologie Lithium Fer Phosphate (LFP) à refroidissement par air s'est imposée comme une solution optimale, en particulier pour :

- Sa **facilité d'intégration dans des volumes restreints**, un atout essentiel pour les navires aux espaces techniques contraints.
- L'**absence de boucle de refroidissement liquide**, ce qui réduit la complexité d'installation et les risques de fuites.
- Sa **bonne tenue thermique** dans les plages de fonctionnement prévues, notamment grâce à la stabilité intrinsèque de la chimie LFP.

NMC vs. LFP Cell

NMC = Lithium Nickel Manganese Cobalt
LFP = Lithium Ferro Phosphate

NMC Pouch Cell (immediate thermal-runaway with fire)



LFP Prismatic Cell (no fire, only gas possible) only this kind of cells are integrated in LM Systems



Source: <https://www.youtube.com/watch?v=bYtDd5Nfq-4>

2. Fournisseurs considérés : Lehmann Marine vs PowerTech Systems

Deux fournisseurs ont été étudiés pour équiper le système hybride :

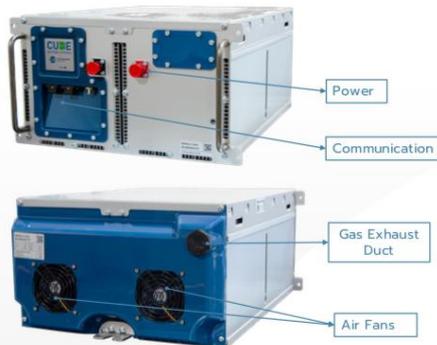
a. Lehmann Marine

Lehmann Marine propose des batteries maritimes LFP éprouvées, intégrées dans le système modulaire **CUBE** à refroidissement par air. Le système se distingue par :

- Chaque module fournit **12,5 kWh**, à 77V/162 Ah.
- Une **densité énergétique élevée** (jusqu'à 212 Wh/l) et une **densité massique de 134 Wh/kg**.
- Une **certification tripartite (DNV, RINA, Bureau Veritas)** adaptée aux exigences maritimes.
- Une **sécurité accrue**, grâce à une architecture empêchant la propagation thermique, même en cas de court-circuit ou surcharge.
- Une **intégration modulaire**, avec des configurations flexibles (jusqu'à 11 CUBEs par string et 16 strings par cluster, soit plus de 1 MWh possible).
- Un système éprouvé avec de nombreuses **références opérationnelles**, notamment sur des ferries, navires de travail, bateaux passagers ou de pêche.

Coût indicatif : **~490 €/kWh**, avec certification complète.

CUBE - Battery CUBE



Technical Data

V _{min/nom/max}	60/77/87	VDC
C-rate cont.*	1	C
C-rate cont. RMS**	0.6	C
Energy	12.5	kWh
Weight	96	kg
Height	249	mm
Width	415/458	mm
Depth	572	mm
Energy density	211	Wh/l
	124	Wh/kg
Cooling	Forced Air	
BMS	Included	
Protection	IP65	
Power supply air fans	24	VDC

* Continuous: complete charge or discharge
** RMS: Indefinite alternating charge or discharge

CUBE - Battery Strings



CUBES per String	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nominal Voltage	230 VDC	307 VDC	384 VDC	461 VDC	538 VDC	614 VDC	691 VDC	768 VDC	845 VDC
Min Voltage	180 VDC	240 VDC	300 VDC	360 VDC	420 VDC	480 VDC	540 VDC	600 VDC	660 VDC
Max Voltage	263 VDC	350 VDC	438 VDC	526 VDC	613 VDC	700 VDC	788 VDC	876 VDC	964 VDC
Weight (without racking & cabling)	290 kg	380 kg	470 kg	560 kg	650 kg	740 kg	830 kg	920 kg	1010 kg
Energy	37,5 kWh	50,0 kWh	62,5 kWh	75,0 kWh	87,5 kWh	100,0 kWh	112,5 kWh	125,0 kWh	137,5 kWh

b. PowerTech Systems

PowerTech propose le système **PowerModule**, basé également sur des cellules LFP avec une approche modulaire plug-and-play :

- Chaque module fournit **5,4 kWh**, à 48V/105 Ah.
- Le système est **scalable** jusqu'à **688 kWh** (128 modules), permettant une grande souplesse d'architecture.
- Deux variantes disponibles :
 - **Standard** : 3 500 cycles, 450 €/kWh, certifié Bureau Veritas.
 - **Solid State (à venir fin 2025)** : durée de vie doublée à 6 000 cycles, capacité de décharge élevée jusqu'à **3C en pic** – très adaptée aux **applications dynamiques** comme le filtrage ou la propulsion à forte variation.
- Équipé de la technologie **BMS Matrix®**, avec monitoring avancé, équilibrage inter-modules et système de chauffage intégré.
- Garantie de base de **2 ans**, extensible à 5 ans avec un surcoût de 15 %.



PowerModule

Scalable and modular Lithium-Ion energy storage system



PowerModule® : Modular, Smart, Safe and efficient energy storage solution.

Modular Design

Each **PowerModule block** is designed around a high performance **5.4 kWh Lithium Iron Phosphate (LiFePO4)** battery composed of **sealed cells**.

Each module is equipped with **BMS Matrix®** technology, which ensures the complete safety of the battery in real time and drastically extends its lifespan. The BMS also manages a cell **heating system** for operation in temperatures down to -25°C.



The PowerModule blocks are connected to each other by a private and secure communication bus. This distributed architecture ensures **high fault tolerance** and **easy commissioning**.

Key advantages

- **"Plug-and-Play"** and flexible system : Easy and fast commissioning
- **Scalable system** : Serial and/or Parallel assembly up to 128 modules to fulfill the most complex applications
- **Real-time monitoring** in the cloud is available
- **Stainless steel housing IP 54 (IP65 upon request)**
- **Amphénol waterproof connection (IP67)**
- **External communication** by **CAN bus** available
- **High lifespan** and number of cycles

PowerModule unit - Technical Specifications

Min / Nominal / Max voltage	48.0 V / 51.2 V / 58.4 V
Nominal capacity (at 1C, 25°C)	105Ah (5.376 kWh)
Weight (+/- 3 %)	43.5 Kg
Dimensions (l x w x h)	400 x 290 x 230 mm
Operation temperature	from -20°C, up to +60°C
Protection Index	IP54 (IP65 upon request)
Power connector	Amphenol Powerlok Ind P67
Specific energy	123.5 Wh/Kg
Energy density	201.5 Wh/l
Continuous discharge current (at 20 °C)	125 A (6.40kW)
Peak discharge current (10 minutes / 30 sec)	200 A (10.24kW) / 250 A (12.80kW)
Recommended charge voltage	57.0 V (max 58.4V)
Floating charge voltage	53.4 V
Standard charge Current	50 A (2.56kW)
Fast charge Current	100 A (5.12kW)

Certifications

- CE, UN 38.3, IEC 62619, IEC62620, IP54
- BV Type Approval for Steel Ships, BATTERY SYSTEMS, UMS, CCS, PORT, IMS

Technical features of BMS Matrix® Technology

- **Monitoring** of each PowerModule block : current, power, voltage, PCB temperature, cell voltage and temperature, State of Charge (SOC), State of Health (SoH), Contactor states, etc...
- **Realtime communication** of alerts, warning and status messages using bus **CAN 2B** for external devices.
- **Intra and Inter module balancing**. This function ensures perfect cell balancing within each module and between all modules in a system
- **Automatic cut-off** triggered by alert events, ie : over-current, over-charge, over-temperature, etc, or manually triggered by CAN message
- **Cell heating system management**




APPLICATIONS

- Industrial vehicles
- Marine
- UAV
- Robotics
- Heavy duty traction
- Energy storage
- ...

Further information at : www.powertechsystems.eu
or contact our commercial office :
+33 185 400 970 or contact@powertechsystems.eu





PowerModule Solid State

High Performance and Scalable Lithium-ion energy storage system



PowerModule® Solid State: Modular, Smart, Safe and efficient energy storage solution.

Modular Design

PowerModule is designed around a high performance **5.43 kWh Lithium Iron Phosphate (LiFePO4)** battery composed of **Solid State technology cells**.

This new technology allow **fast charge**, **50% increased lifetime compared to legacy technology**, improved safety with **non-flammable electrolyte**, and **very low cell heat-up** during use.

Each module is equipped with **BMS Matrix®** technology with active balancing, to ensures total battery safety in real time and considerably extends battery life. The BMS manages cell reheating for **low-temperature operation down to -25°C**.

The PowerModule blocks are connected to each other by a private and secure CAN communication bus. This distributed architecture ensures: **high fault tolerance** and **easy commissioning**.

The high modularity and scalability allow to easily build storage systems **up to 819 VDC nominal and 700kWh**

Key advantages

- "Plug-and-Play" and flexible system : Easy and fast commissioning
- New solid state cell technology with highest safety and cycle life
- Scalable system : Serial and/or Parallel assembly up to **128 modules** to fulfill the most complex applications
- Real-time monitoring in the cloud is available
- Stainless steel housing IP 67 rated
- Amphénol waterproof connection (IP67)
- Internal and external communication by CAN bus
- High lifespan and number of cycles
- Pressure relief valve on front panel

PowerModule - Technical Specifications

Min / Nominal / Max voltage	48.0 V / 51.2 V / 58.4 V
Nominal capacity (at 1C, 25°C)	106Ah (5.43 kWh)
Weight (+/- 3 %)	49.5 Kg
Dimensions (l x w x h)	485 x 296 x 230 mm
Operation temperature	from -20°C, up to +60°C
Protection Index	IP67
Power connector	Amphenol Powerlok IP67
Specific energy	109.7 Wh/Kg
Energy density	164.4 Wh/L
Continuous discharge current (at 20 °C)	200 A (10.24kW)
Peak discharge current (at 20 °C)	300 A (15.36kW) for 15 minutes
Recommended charge voltage	57.0 V (max 58.4V)
Floating charge voltage	53.4 V
Standard charge Current	100 A (1 hour)
Fast charge Current	200 A (30 minutes)

Certifications

- CE, UN 38.3, IEC 62619, IEC62620
- Pending : Type Approval Off-shore Marine Battery System, ECE R100

Technical features of BMS Matrix® Technology

- **Monitoring** of each module : current, power, voltage, cell voltage and temperature, State of Charge (SOC), State of Health (SoH), Contactor states, etc...
- **Active Balancing** for a quick and energy efficient cell balancing process
- **Realtime communication** of alerts, warning and status messages using bus CAN 2B for external devices.
- **Intra and Inter module balancing**. This function ensures perfect cell balancing within each module and between all modules in a system
- **Automatic cut-off** triggered by alert events, ie : over-current, over-charge, over-temperature, etc., or manually triggered by CAN message
- **Cell heating** system management



APPLICATIONS

- Industrial vehicles
- Last mile delivery
- Electric vehicles
- Marine
- UAV
- Robotics
- Heavy duty traction
- Energy storage
- ...



MADE IN FRANCE

Further information at : www.powertechsystems.eu
or contact our commercial office :
+33 185 400 970 or contact@powertechsystems.eu

c. Comparaison et choix final

Critère	Lehmann Marine	PowerTech Systems
Chimie	LFP	LFP
Refroidissement	Air	Air
Modularité	Très élevée (jusqu'à 1 MWh)	Élevée (jusqu'à 688 kWh)
Certification	DNV, RINA, Bureau Veritas	Bureau Veritas
Densité énergétique (Wh/l)	Jusqu'à 212	201.5
Puissance (décharge)	1C en continu (CUBE)	2C continu, 3C en pic
Coût	~490 €/kWh	~450 €/kWh
Garantie	80% de la performance après 10 ans	2 ans (ext. à 5 ans)
Expérience maritime	Forte (>50 navires)	Moins développée
Intégration avec chantiers	PIRIOU (retour d'expérience)	Non spécifié

Pour le premier démonstrateur industriel basé sur le NAONED, Le choix s'est orienté vers **Lehmann Marine**, notamment en raison :

- de leur **retour d'expérience solide dans le secteur maritime**,
- des **références concrètes avec des chantiers navals comme PIRIOU**,
- de la **fiabilité** éprouvée des systèmes dans des applications réelles,
- et de la **complétude de la chaîne de valeur** (développement, production, intégration).

Cependant, **PowerTech Systems reste un acteur à surveiller**, en particulier pour des besoins à forte puissance instantanée ou des architectures à forte modularité grâce à sa capacité en pic (jusqu'à 3C), ce qui le rend pertinent pour des applications de filtrage ou de boost tout en minimisant la quantité (et le cout) des batteries embarquées.

3. Résultats techniques et bénéfices attendus

Les simulations montrent que ce système permet :

- une **réduction de la charge transitoire sur le moteur thermique**,
- une **diminution des surconsommations liées aux phases dynamiques** (filage, virage, mise en vitesse),
- un **fonctionnement globalement plus stable et optimisé**, en permettant au moteur thermique de rester proche de son point optimal.

Enfin, cette configuration permettrait de **limiter encore plus la taille du pack batterie**, en se concentrant sur la capacité à délivrer de la puissance instantanée (valeur de C-rate élevée), plutôt que sur une autonomie étendue inutile dans le cas de la pêche côtière ou semi-hauturière.

16. Adaptation de l'hélice au nouveau système hybride parallèle

L'hélice du *Naoned* est un composant central dans la performance énergétique globale du système propulsif. Il s'agit d'une **hélice à pas variable**, permettant d'adapter en temps réel l'angle des pales pour moduler la poussée à régime moteur constant. Ce type d'hélice est particulièrement adapté à une hybridation, car il offre une souplesse de réglage qui permet de maintenir le moteur thermique dans sa zone optimale de rendement, quelle que soit la charge.

Dans le cadre du projet HYBA, l'hélice a fait l'objet de multiples discussions entre les différents partenaires du consortium et a montré la force d'un consortium multi-compétences nécessaires pour permettre d'optimiser la chaîne de propulsion.

1. Hélice actuelle

L'hélice actuelle a été utilisée pour l'ensemble des études et simulations de Vectura System et IMT Atlantique pour permettre un comparatif simple des gains liés à l'hybridation parallèle:

- d'une **modélisation basée sur les cartographies KT-KQ**, intégrant les lois de poussée en fonction du pas, de la vitesse du navire, et des conditions maritimes (houle),
- d'une **intégration dans le simulateur multiphysique** développé sous Python/Cosapp,
- d'une **interpolation de cartographies de rendement** pour quantifier avec précision les pertes ou gains selon les régimes.

Cette modélisation a permis de mettre en œuvre une **loi de conjugaison** entre le régime moteur et le pas d'hélice couplé à un hamiltonien pour la gestion des 2 sources d'énergie : Carburant fossile et énergie Electrochimique. Elle permet d'atteindre un **fonctionnement hybride cohérent**, en couplant intelligemment moteur thermique (MTH) et moteur électrique (MEL), avec une stratégie d'optimisation des cycles de fonctionnement selon la phase de navigation (route, pêche, virage, traction...).

Enfin, les simulations menées à hélice, ratio du reducteur et moteur pré-définis, ont confirmé que **le rendement global propulsif peut être amélioré de 2 à 3 %** par l'optimisation conjointe du pas d'hélice et du régime moteur dans le cas d'une propulsion Diesel conventionnelle.

2. Optimisation de la ligne propulsive

Des potentiels d'amélioration sont envisageables grâce à un co-dimensionnement de la chaîne propulsive globale : choix du ratio du réducteur, du moteur thermique et de l'hélice.

Dans le cadre du projet, un premier pré-dimensionnement a été réalisé par Masson pour une chaîne propulsive Diesel conventionnelle.

Dans le but de réduire/optimiser la consommation de carburant du bateau, il est primordial d'optimiser au maximum la ligne de propulsion existante. Dans un premier temps le moteur thermique sera changé, passant d'un ABC 900cv(662kW)@750rpm ($P/n=0.882$) à un Mitsubishi 645kW@1400 rpm ($P/n=0.460$) beaucoup plus compact. Faisant suite au changement de moteur et afin de garantir au moins les mêmes performances bateau, le réducteur sera lui aussi changé passant d'un ESD 800 ratio 2.953 à un W7400 NR EW ratio 6.439.

La modification de ces deux éléments (moteur et réducteur) permettra pour un encombrement plus faible, d'apporter un couple plus élevé à l'hélice :

→ Couple à l'hélice ancienne configuration : $(0.882*955)*2.953 = 2487.3$ daN.m

→ Couple à l'hélice nouvelle configuration : $(0.460*955)*6.439 = 2828.65$ daN.m

Soit une augmentation du couple à l'hélice de $\pm 13\%$.

Du côté de l'hélice à pas variable (HPV804), cette nouvelle configuration reste dans les performances maximales admissibles du matériel ; P/n (à l'hélice) : $645\text{kW}/217.42\text{rpm} = 2.97\text{kW}/\text{rpm} < 3.3 \text{ kW}/\text{rpm}$.

L'optimisation de la ligne propulsive passera aussi par une optimisation des pales de cette dernière. En effet en 26 ans, les profils hydrodynamiques des pales ont grandement évolué et permettent d'augmenter le rendement des hélices (et donc de les rendre moins énergivores). MASSON MARINE fournira donc un nouveau jeu de pales moderne à monter sur l'HPV804 d'origine.

La résultante de toutes ces modifications et une augmentation de la poussée théorique de l'hélice au point fixe passant de 14.3 kg/cv à 15.9kg/cv. Cependant ces valeurs sont à valider lors d'essais de traction au point fixe.

Ce pré-dimensionnement de Masson, basé sur le couple moteur à régime fixe, demanderait à être affiné via un plan d'expérience (DoE) sur une gamme de composants plus large, permettant **l'optimisation de la composition de la chaîne propulsive pondérée sur les scénarios, avec loi de conjugaison et hybridation parallèle grâce à la plateforme EcoBoatTwin.**

17. Évaluation technico-économique des solutions

1. Chiffrage du projet de R&D pour le développement du Démonstrateur industriel HYBA Phase 2 sur le NAONED:

HYBA Phase 2: Démonstrateur industriel de l'Hybridation parallèle sur le NAONED de l'APAK		Matériel	Manpower	Repartition des couts
Innovation	Vectura System			710 750 €
	Phase 2 - Ingenieur + Coordination Projet (Dimensionnement, optimisation, Essai)		414 750 €	
	Phase 2 - Controle-Commande - Matériel	45 000 €		
	Phase 2 - Controle-Commande - Main Oeuvre		27 000 €	
	Phase 2 - Controle-Commande - Sous-traitance		20 000 €	
	IMT Nantes			
Phase 2 - 1 Post Doc- Optimisation Energétique / Réseau Neurone sur 2 ans		204 000 €		
Chantier Naval et Architecture Navale	Chantier Naval --> PIRIOU			765 061 €
	Phase 2 - Mise-a-sec		43 740 €	
	Phase 2 - Travaux Preparatoires Exterieur		20 223 €	
	Phase 2 - Travaux Preparatoires Salle Machines		90 719 €	
	Phase 2 - Démontage GMP actuel		36 505 €	
	Phase 2 - Local Batteries	36 240 €	144 958 €	
	Phase 2 - Adaptation de la salle Machines		127 229 €	
	Phase 2 - Integration Nouveaux Equipements		171 739 €	
	Phase 2 - Peinture & CEuvres vives		15 029 €	
	Phase 2 - Mise en route et Essais		9 314 €	
	COPREXMA			
	Phase 2 - Piriou assistance Stabilité		9 365 €	
	Phase 2 - Architecture Navale + Experience Stabilité		30 000 €	
	Phase 2 - Prestation BV		30 000 €	
Composants pour l'hybridation parallèle	Moteur Thermique			517 780 €
	Phase 2 - Mitsubishi S6R2	167 670 €		
	Masson			
	Phase 2 - Reducteur Masson	173 700 €	12 000 €	
	Moteur Electrique			
	Phase 2 - Moteur Elec	12 000 €	10 000 €	
	Phase 2 - Onduleur	8 000 €		
	Pack Batterie			
	Phase 2 - Lehmann Marine 200kWh	96 700 €		
50Hz avec Regime Moteur Variable				
Phase 2 - Alternateur Hydraulique	37 710 €			
Armateur	SCAPAK			370 000 €
	Phase 2 - Immobilisation du navire (2 mois; 5k€/jour) - Perte d'exploitation		300 000 €	
	APAK			
	Phase 2 - Suivi par mecanicien de l'armement		40 000 €	
Phase 2 - Gestion de projet par armement		30 000 €		
Démonstrateur Industriel "NAONED"				
		Matériel	Manpower	TOTAL
		577 020 €	1 786 571 €	2 363 591 €

Le cout global du développement du démonstrateur industriel HYBA sur le NAONED s'élève à 2,3 Mio€.

Le démonstrateur industriel HYBA sur le NAONED, bien que destiné à la pêche est un démonstrateur de la technologie hybride parallèle et du potentiel de l'optimisation énergétique des navires de travail.

« The European Commission's Clean Industrial Deal, presented on February 26 2025, also sets the right direction to scale the business case for clean technologies in Europe. Fishing vessels must be included in this effort, as they are among the most complex high-tech ships that exist, with positive technological spillover in other maritime sectors. » Source : Vincent Guerre, SEA Europe

2. Retour sur Investissement « Série HYBA » pour les armateurs, à la suite du démonstrateur industriel NAONED

Ces ROIs sont calculés sans subvention, sans perte d'exploitation pour l'armateur, avec une hypothèse de 1€/litre de carburant et sur la base des données de consommation du NAONED (environ 450 000l/an sur les 3 dernières années).

a. Rétrofit sur navire existant:

- **RETROFIT HYBA GLOBAL avec Changement de moteur**
 - **Gain de consommation d'environ 25%**
 - Cout de la modification : env. 1,25 mio€ (après validation démonstrateur)
 - **ROI de 11 ans (sans subvention) !**
- **RETROFIT PARTIEL : Réducteur + Moteur Electrique + Batteries**
 - **Gain de consommation d'environ 15%**
 - Cout de la modification : env. 1 mio€
 - **ROI de 15 ans (sans subvention) !**
 - Nota : le fait de ne pas changer le moteur peut impacter de déplacer ce dernier (si possible) ou de réduire la taille de la ligne d'arbre en fonction de l'encombrement du nouveau réducteur.

Aux vues de ces résultats, il semble évident de **changer le moteur en même temps que l'hybridation parallèle**, pour un meilleur de gain de consommation et un plus grand potentiel d'optimisation dans le choix des composants (non pris en compte dans le gain présenté).

Néanmoins, ces ROI de 11-15 ans (sans subvention) restent trop élevés.

En réalité, **le retrofit en hybride parallèle sera envisagé par un armateur dans le cas d'une remotorisation**, qui présente elle aussi un cout, cout heureusement combiné à un gain de consommation :

- **Gain de consommation pouvant atteindre environ 7% dans le cas d'une remotorisation à neuf**
- Cout de la modification : env. 550k€
- **ROI de 17ans (sans subvention) !**

En prenant cette information en compte, il est intéressant d'estimer le ROI du **Surcout** de l'hybridation parallèle par rapport une remotorisation conventionnelle.

- **Gain de consommation d'environ 18% par rapport à une remotorisation diesel conventionnel**
- Surcout de la modification : env. 700k€
- **ROI de 9 ans (sans subvention)**

b. HYBA sur navire neuf

Même si le coeur du projet HYBA est focalisé sur les navires existants ; pour rappel un navire neuf en propulsion conventionnel équivalent au Naoned coute aujourd'hui 5mio€; il nous a semblé intéressant d'évaluer l'intérêt pour un navire neuf :

- **Gain de consommation d'environ 15% par rapport à un diesel conventionnel**
- Surcote Hybridation Parallèle par rapport à diesel conventionnel : env. 500 k€
- **ROI de 7,5 ans (sans subvention)**

Il est important de préciser qu'il s'agit là de l'hybridation d'un moteur thermique ayant des variations de charges essentiellement liées à sa navigation dans la houle. Donc ce principe d'hybridation parallèle s'applique bien évidemment aux navires de pêche mais également à **tout navire à propulsion thermique classique évoluant dans une mer formée.**

3. ROI du chalut optimisé :

Les études et simulations combinées du chalut de fonds et de l'impact de la diminution de traction, nous donne des résultats d'environ **5% de gain de consommation**, cela **indépendamment de la chaîne de propulsion.**

Il est donc intéressant de s'attarder sur le ROI de la mise en place d'un chalut de fonds optimisé :

- **Gain de consommation d'environ 5% par rapport à un chalut de fonds conventionnel**
- Surcote à l'achat neuf d'un chalut de fond optimisé (Dynema & Maillage, sans panneaux décollés REVERSE): **5 k€**
- **ROI de 3 mois (sans subvention) !**

Sachant qu'un chalut peut-être considéré comme un consommable, **renouvelé tous les 2-3 ans**, et que le gain est identique selon les types de propulsion, il semble stratégique d'entamer sans attendre des essais de ce type de chalut sur le NAONED, en parallèle des travaux d'hybridation.

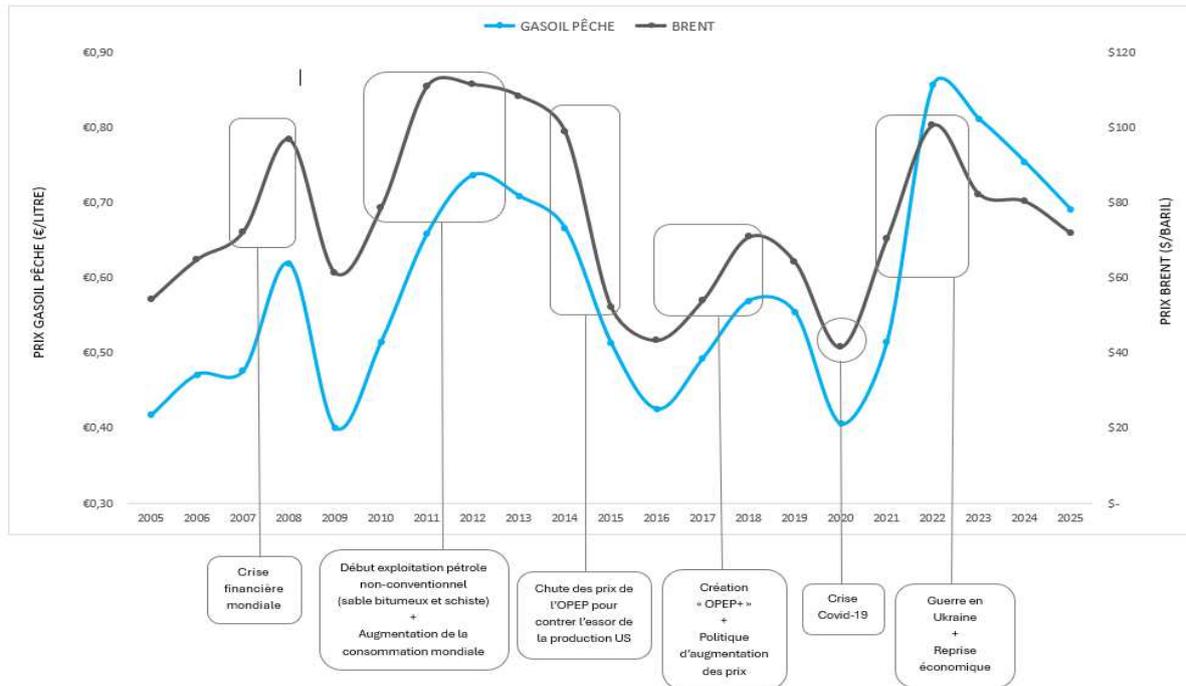
4. Des ROI « pessimistes »:

	Gain de consommation	Coût	ROI* (sans subvention)	Remarques Technico-économiques (sans subvention)
Remotorisation à neuf en diesel conventionnel	7%	550k€	17 ans	Aucun intérêt économique de remotoriser à l'identique, sauf si le moteur n'est plus du tout utilisable d'un point de vue performance
RETROFIT PARTIEL : Réducteur + Moteur Electrique + Batteries	15%	1.000 k€	15 ans	L'hybridation parallèle sera envisagée dans le cas d'une remotorisation complète (et non pas partielle); hormis dans des cas très spécifiques
RETROFIT HYBA GLOBAL avec Changement de moteur	25%	1.250 k€ Surcout de 700k€ par rapport à diesel conventionnel	11 ans ROI du Surcout: 9 ans	Surcout Proche du ROI de 7 ans (standard dans le maritime) sans subvention, avec un potentiel d'optimisation des gains et des coûts suite au démonstrateur industriel HYBA
HYBA sur navire neuf	15%	Surcout de 500k€ par rapport à diesel conventionnel	ROI Surcout: 7,5 ans	Technologie intéressante pour tout navire à propulsion thermique classique évoluant dans une mer formée

Les résultats sur les ROIs présentés ci-dessus sont relativement pessimistes.

En effet, ils prennent en compte un coût moyen du gazole de 1 €/l (coût standard pour les calculs de crédits bancaires des armements de pêche) sans prendre en compte l'évolution dans le temps de ce dernier, qui comme tout le laisse à penser, ne va cesser d'augmenter.

Pour rappel, le prix moyen de vente du gasoil pêche en France métropolitaine a suivi une évolution à la hausse en 20 ans (2000 – 2025), évolution marquée par les fluctuations du marché du carburant (Brent), tout en tenant compte des spécificités propres au secteur de la pêche et de la réglementation locale. Les données présentées dans le graphique ci-dessous proviennent de l’Observatoire du carburant pêche de la Coopération Maritime, qui indique que le prix moyen du gasoil pêche s’établissait à 0,626 €/litre au 31 mai 2025.



Source : Coopération Maritime – Observatoire du Carburant Pêche

De plus, de nombreuses discussions sont en cours à l’Organisation Maritime Internationale pour introduire une taxe carbone sur les navires.

Cette taxe serait dans un premier temps applicable aux plus gros navires « pollueurs » mais, à terme, elle serait appliquée aux plus petits ; elle sera directement liée à la consommation d’énergie fossile à bord.

Cette taxe augmentera donc le coût d’exploitation des navires fonctionnant à énergie fossile, et donc, en réduisant cette consommation d’énergie fossile via l’hybridation on améliorera le retour sur investissement de la transformation.

On pourrait imaginer que les subventions futures dans le cas d’une modification de navire visant à décarboner les opérations de ce dernier soient mise en parallèle avec cette taxe carbone, ou tout du moins, les gains en terme d’émissions de CO2eq estimés par la modification du navire.

18. Communication, Valorisation et Transfert

Ce Work Package vise à organiser la diffusion des résultats du projet HYBA, à en valoriser les apports auprès des acteurs de la filière halieutique, des partenaires institutionnels et techniques, ainsi qu'à préparer une phase 2 structurante pour la transition énergétique maritime.

1. Rédaction des livrables et synthèses

- Production des livrables finaux pour chaque WP.
- Synthèses vulgarisées pour les professionnels, décideurs, grand public.
- Consolidation du rapport global HYBA avec recommandations stratégiques.

2. Organisation de la restitution auprès des parties prenantes

- Événements de restitution (17 Juin à 17h30 en digital & 4 Juillet en présentiel à Lorient)
- Présentation aux coopératives, OP et DIRM.
- Mise à disposition des données auprès du CRPMEM sur plateforme web sécurisée
- Participation à des salons et conférences

3. Revue de presse et visibilité publique

Le projet HYBA a bénéficié d'une couverture presse et institutionnelle importante entre 2023 et 2025. Voici une sélection de publications :

- **Le Télégramme – Tests du moteur hybride (17 juillet 2024)** – <https://www.letelegramme.fr/morbihan/lorient-56100/a-lorient-les-tests-du-futur-moteur-hybride-pour-bateau-ont-commence-6628391.php>
- **Mer et Marine – Naoned et transition bas carbone** – <https://www.meretmarine.com/fr/peche/le-naoned-se-prepare-pour-sa-transition-energetique-bas-carbone>
- **France Filière Pêche – Projet HYBA** – <https://www.francefilierepeche.fr/projets/hyba-etude-motorisation-hybride-navires-peche/>
- **Pôle Mer Bretagne Atlantique – HYBA** – <https://www.pole-mer-bretagne-atlantique.com/ressources-biologiques-marines/hyba>
- **Bretagne Pêche – Lancement HYBA** – <https://www.bretagne-peches.org/peche-embarquee/lancement-du-projet-partenarial-hyba/>
- **Capitaine Carbone** – <https://www.capitaine-carbone.fr/je-minforme/le-blog-du-capitaine/vectura-system-entretien-avec-une-startup-engagee/>

4. Présentations et évènements majeurs du projet HYBA (2023–2025)

- Lancement officiel du projet HYBA – Juillet 2024, en présence de Région Occitanie, Mer Invest et Meet 2050
- Salon Itechmer 2024 – Lauréat du prix Innovation Transition Énergétique (octobre 2024, Lorient)
- Présentation à la presse régionale – Août 2024 (Le Marin, Télégramme, France Bleu)
- Présentation au comité technique de l'OP Pêcheurs de Bretagne – Novembre 2024
- BlueInvest – Mars 2025, Bruxelles (pitch du projet EcoBoatTwin auprès d'investisseurs et clusters européens)
- Rencontres DGMare – Mars 2025, Lorient
- Visite officielle de la Ministre de l'Écologie et du Commissaire européen – Avril 2025, Lorient
- Participation au GT 'Energy Transition Partnership for Fisheries and Aquaculture' – Avril 2025 (Bruxelles)
- Interventions dans des webinaires techniques CNPMM, Coopération Maritime, Pôle Mer Bretagne – tout au long de 2024–2025
- Présentation au Cabinet de la Ministre de l'écologie le 2 Juin 2025
- Dans les 6 Finalistes du Congrès SIA avec les étudiants IFP School le 12 juin 2025; qui vont présenter un EMS V2
- Présentation le 17 Juin à 17h30 devant les institutions, organisations professionnelles et les financeurs potentiels publics et privés du démonstrateur industriel de la phase 2

5. Conclusion

L'effort de structuration et de diffusion des résultats HYBA, ouvrent la voie à un passage à l'échelle, en assurant à la fois visibilité, appropriation par les acteurs métier, et documentation stratégique pour le développement futur de la plateforme **EcoBoatTwin** et **des solutions d'hybridation parallèle dans la pêche** et potentiellement de **tout autre navire hauturier à propulsion thermique conventionnelle**.

19. EcoBoatTwin: Démonstrateur numérique pour la transition énergétique des navires de pêche – Livrable additionnel

Ce Work Package additionnel s'inscrit dans la continuité des travaux du projet HYBA. Il vise à documenter la conception, la mise en œuvre et les bénéfices associés au MVP (Minimum Viable Product) du jumeau numérique **EcoBoatTwin**, développé conjointement par IMT Atlantique et Vectura System. Ce démonstrateur représente un jalon clé pour la digitalisation de la gestion énergétique des navires de travail.

1. Objectif

L'objectif est double :

- Fournir une preuve de concept opérationnelle de la plateforme EcoBoatTwin appliquée au chalutier Naoned.
- Évaluer l'intérêt et la faisabilité d'un déploiement à plus grande échelle dans la filière halieutique.

Ce travail s'appuie sur les données collectées en mer via l'instrumentation du Naoned (WP-A) et sur les modèles énergétiques développés dans WP-C (modèles M1 et M2).

2. Travaux réalisés

- Modélisation numérique :
 - Implémentation du modèle M1 (100% diesel) pour calibration.
 - Implémentation du modèle M2 (hybride parallèle) intégrant des scénarios de rétrofit réalistes.
 - Analyse comparative des consommations, performances et émissions.
- Interface utilisateur et restitution :
 - Prototypage d'un SaaS (niveau TRL6) à destination des architectes navals et des opérateurs.
 - Support pour le calcul du TCO (Total Cost of Ownership)

3. Résultats obtenus

- Modèle validé sur données réelles : précision supérieure à 90% pour les phases nominales.
- Bilan énergétique complet par mission-type : navigation, traction, filage, virage.
- Simulation de configuration hybride parallèle montrant jusqu'à 25% de réduction de la consommation de carburant.
- Réduction de 50% des temps d'ingénierie pour la conception d'architectures énergétiques embarquées.

4. Perspectives

- Modélisation des effets de la houle sur la coque, l'hélice, le chalut et leurs impacts sur les sollicitations du groupe motopropulseur
- Connexion automatisée des Fuel-Trackers à la plateforme EcoBoatTwin pour exploitation temps réel et post-traitement.
- Développement d'une interface de lecture automatique des profils énergétiques par scénario de mission (thon, merlu) et scénarisation automatisée des profils d'usage
- Extension de la plateforme à d'autres types de navires de travail (remorqueurs, offshore, ferry).
- Enrichissement des modèles avec apprentissage machine sur données historiques.
- Déploiement en flotte : création de référentiels comparatifs inter-navires.
- Tableaux de bord : flux énergétiques, courbes de consommation, scénarios de maintenance prédictive.
- Intégration des calculs TCO (Total Cost of Ownership) affinés pour dimensionnement des investissements.
- Développement d'indicateurs standardisés pour la certification environnementale, par exemple dans le cadre de fiches CEE

5. Intérêt pour la filière

Le MVP EcoBoatTwin ouvre de nouvelles perspectives pour la filière pêche et maritime en général :

- Prise de décision éclairée pour les investissements (rétrofit, hybridation, etc.).
- Accompagnement des démarches de transition énergétique et de certification environnementale.
- Contribution à la structuration d'un référentiel commun pour les performances énergétiques dans la pêche.
- Amélioration de la rentabilité opérationnelle et réduction des risques économiques liés à la variabilité des coûts de carburant.
- Renforcement de la compétitivité de la construction navale française via l'outillage numérique des chantiers.

6. Conclusion

La réalisation du MVP EcoBoatTwin dans le cadre du projet HYBA démontre la faisabilité et la pertinence d'une approche numérique avancée pour l'optimisation énergétique des navires de pêche. EcoBoatTwin matérialise le lien entre expérimentation embarquée, modélisation numérique et déploiement d'un outil SaaS à vocation opérationnelle. Cette initiative s'inscrit pleinement dans les priorités de la décarbonation du secteur maritime et préfigure de futurs standards numériques pour la filière halieutique.

Lien vers le website : hyba.ecoboattwin.io

20. Conclusion Technique et scientifique

1. Conclusion sur l'architecture hybride parallèle et recommandations d'optimisation

L'architecture **hybride parallèle** retenue dans le projet HYBA offre un compromis technico-économique pertinent pour leetrofit de navires de pêche existants comme le *Naoned*. Elle permet un **partage dynamique des efforts propulsifs** entre un moteur thermique principal et un moteur électrique secondaire, tout en conservant une architecture mécanique connue (ligne d'arbre + réducteur + hélice à pas variable).

Cependant, les travaux menés ont montré que le **potentiel réel de cette hybridation repose sur une série de boucles d'optimisation interdépendantes** :

- **Choix du ratio de réducteur** : en ajustant la démultiplication, on peut déplacer le point de fonctionnement du moteur thermique vers sa zone optimale de rendement (souvent autour de 60–75 % de charge à régime moyen).
- **Sélection de l'hélice** : différentes hélices à pas variable ou fixe permettent de moduler la charge mécanique sur la ligne d'arbre. Un catalogue d'hélices adaptées à chaque usage devrait être simulé pour chaque type de navire.
- **Spécification du moteur thermique** : il est préférable d'opter pour un moteur au **rendement élevé mais peu dynamique**, c'est-à-dire optimisé pour un fonctionnement stable, au plus proche de son meilleur point spécifique de consommation (CSE). La **gestion des phases transitoires** (accélérations, manœuvres, virages) peut alors être confiée au **moteur électrique**, capable d'assurer les pics de couple de manière plus rapide et efficace.

Concernant le **dimensionnement des batteries**, les simulations HYBA montrent que **leur capacité de délivrance instantanée (puissance en kW)** est bien plus critique que leur capacité totale (kWh). Une batterie bien choisie, avec une technologie capable de supporter un **taux de décharge élevé (nombre de C-rate > 1)**, permet de :

- compenser efficacement les pics de charge,
- **éviter de sur-dimensionner inutilement la batterie**, ce qui alourdirait le navire et réduirait le retour sur investissement global.

L'augmentation de la capacité batterie n'est réellement utile que dans deux cas :

1. **Navigation prolongée en tout-électrique à basse vitesse** (dans les ports, ZFE maritimes),
2. **Scénarios d'usage courts (1–2 jours)** permettant un rechargement rapide entre deux missions.

Enfin, les résultats du projet HYBA soulignent l'intérêt d'une **approche systémique combinant** :

- **écoconduite** (réduction des manœuvres inutiles, adaptation du pas d'hélice),
- **scénarisation des usages** (trajectoires types, temps de traction, mouillage...),
- **dimensionnement énergétique global**.

Chaque boucle d'optimisation apporte des gains supplémentaires sur la consommation, tout en **limitant les investissements initiaux**. Cette approche raisonnée constitue une voie concrète pour la transition énergétique de la filière pêche, tout en préservant sa viabilité économique.

2. Réduction des émissions de NO_x : un enjeu complémentaire à l'économie de carburant

Au-delà de la réduction de la consommation de carburant, l'un des objectifs stratégiques de la transition énergétique maritime concerne la diminution des émissions de **NO_x (oxydes d'azote)**, polluants atmosphériques majeurs émis par les moteurs diesel. Ces émissions sont particulièrement visées par les réglementations internationales dans les zones **NECA (Nitrogen Emission Control Areas)**, notamment en Manche et en mer du Nord. Les travaux menés dans le cadre de HYBA ont permis de démontrer, sur la base des publications scientifiques d'IFP Energies Nouvelles, qu'il est possible d'**adapter le système de gestion d'énergie (EMS)** afin d'optimiser simultanément la consommation et les rejets polluants. Une version étendue de l'algorithme hamiltonien permet ainsi d'intégrer les NO_x dans la fonction d'optimisation, avec un compromis maîtrisé entre performance énergétique et impact environnemental. Les premiers résultats indiquent qu'une **réduction de l'ordre de 40 % des NO_x** est atteignable, **avec moins de 5 % de surconsommation**. Cette approche ouvre la voie à une **conformité proactive** avec les futures normes SECA/NECA, tout en assurant la compétitivité opérationnelle des unités concernées.

3. Conclusion – Chalut optimisé et réduction de la traction

L'analyse détaillée des engins de pêche actifs employés par le Naoned, notamment dans les campagnes de pêche en « bœuf » avec le Dolmen, a permis de quantifier l'impact direct du design du chalut et des conditions de remorquage sur la traction nécessaire à son avancement. Cette traction constitue un facteur déterminant de la charge propulsive demandée au navire.

Les simulations réalisées avec le logiciel DynamiT (Ifremer), combinées aux mesures in situ, ont permis de modéliser et d'analyser trois configurations principales de chaluts utilisés sur le Naoned :

- **Le chalut pélagique à thons** : ouverture horizontale attendue de 84 m, remorqué à 4,5–6 nœuds. Avec un filage de 250 m et des matériaux allégés, une réduction de la traction de l'ordre de 10,6 % a été obtenue par rapport à la version standard.

- **Le chalut pélagique à merlus** : très grande dimension (396 m de longueur totale), utilisé à 2,5–3 nœuds. Malgré une surface importante (520 m²), l'optimisation n'a pas été retenue ici en raison de conditions de remorquage sensibles aux courants et aux contraintes d'usage collectif en pêche en paire.

- **Le chalut de fond** : modélisé mais non testé en mer durant HYBA. Une version optimisée (toile allégée en PE haute ténacité et Dyneema, surface réduite à 108 m²) a permis une réduction de traction jusqu'à 15,4 % à 3,5 nœuds, tout en conservant les performances géométriques en pêche.

Ces réductions de traction représentent une opportunité mécanique concrète pour diminuer la sollicitation propulsive, en s'inscrivant dans une stratégie plus large d'optimisation du système navire + engin. Elles ne doivent toutefois pas être confondues avec un gain énergétique direct, qui dépend également de la propulsion, de l'hélice et de l'environnement marin.

En parallèle, certaines pistes comme l'allègement du bourrelet ou le décollage systématique des panneaux – déjà explorées dans d'autres projets comme REVERSE – n'ont pas permis d'obtenir de résultats probants dans le cadre du projet HYBA, en raison de contraintes mécaniques et d'une perte d'efficacité halieutique. Toutefois, ces axes de recherche méritent d'être approfondis, notamment dans des contextes de pêche spécifiques et avec des ajustements fins du gréement. Ils constitueront un axe de travail central du projet HYCO, successeur de HYBA, qui vise à explorer des solutions complémentaires centrées sur le train de pêche, les configurations hydrodynamiques avancées, et la réduction des impacts sur les habitats benthiques.

4. Complément à la conclusion générale – Perspectives technologiques

Les travaux réalisés dans HYBA, enrichis par la plateforme EcoBoatTwin, démontrent la **maturité croissante des technologies hybrides pour la pêche professionnelle**. En plus d'optimiser la consommation, la plateforme offre une **aide à la décision pour le rétrofit**.

À l'avenir, des modules supplémentaires pourraient être intégrés :

- Simulation des NOx et CO₂,
- Extension à d'autres typologies de navires (dragueurs, fileyeurs),
- Intégration de modules de prédiction météo et de route énergétique.

La méthode d'optimisation pourrait également être adaptée aux contraintes réglementaires SECA/NECA en intégrant des critères multi-objectifs (carburant + pollution).

21. Conclusion globale du projet HYBA – Vision stratégique et perspectives élargies

Le projet HYBA (Hybride Bretagne Atlantique) constitue une étape structurante dans la transition énergétique du secteur de la pêche professionnelle. Porté par un consortium public-privé aux compétences pluridisciplinaires, HYBA a permis de démontrer, par l'expérimentation concrète à bord du chalutier NAONED, la faisabilité technique, les conditions d'efficacité et les freins systémiques associés à l'introduction de motorisations hybrides dans le monde de la pêche.

Au-delà de la seule propulsion, HYBA a mis en lumière le rôle déterminant du train de pêche dans la consommation énergétique globale du navire. Comme le souligne le PMBA, près des deux tiers de la consommation d'un chalutier proviennent du seul remorquage de l'engin de pêche. Ainsi, le projet a montré que l'optimisation du chalut, à travers la réduction de la surface de toile, l'usage de matériaux plus légers (Dyneema, PE haute ténacité), ou encore l'adaptation du gréement et du filage, permet une baisse significative de la traction (jusqu'à 15 %) sans dégradation des performances halieutiques.

L'approche systémique adoptée dans HYBA (coque, hélice, moteurs, engin de pêche, usage) a été consolidée par la mise en œuvre d'un jumeau numérique – l'EcoBoatTwin – aujourd'hui prêt à être déployé dans d'autres contextes. Ce simulateur technico-économique permet aux armateurs, architectes et financeurs d'évaluer rapidement l'intérêt et la rentabilité des scénarios de transformation énergétique.

Les travaux issus d'HYBA alimentent également les réflexions structurantes au niveau européen. Le rapport techno-économique pour la transition énergétique des pêches (2024) souligne que les flottes hauturières (LSF) sont les plus émettrices (3,7 Mt CO₂e soit 73 % du total), mais que les flottes côtières (SSCF) peinent à investir malgré des gains d'efficacité significatifs. HYBA confirme ce constat, notamment sur l'importance du monitoring embarqué, de l'optimisation hydrodynamique (hélice, coque) et de la valorisation des données pour construire des modèles adaptés aux différents métiers.

Des projets comme LIBFISH, en continuité avec HYBA, montrent que la convergence entre approche industrielle, recherche appliquée et planification territoriale (ports, carburants alternatifs, infrastructures) est essentielle. La roadmap issue du groupe de travail 'Shipbuilding WG' appelle ainsi à des réformes réglementaires et à une révision du FEAMPA pour mieux accompagner la transition. L'enjeu n'est pas simplement technique : il est économique, social et territorial.

Enfin, HYBA a permis de faire émerger plusieurs initiatives structurantes :

- HYCO: poursuite de l'hybridation des chalutiers en Méditerranée (PHEV),
- Quai des Experts : accompagnement des marins pêcheurs pour le financement,
- LIBFISH : innovations techniques pour limiter l'impact environnemental des chaluts,
- EcoBoatTwin : outil de référence pour la simulation technico-économique.

La conclusion principale d'HYBA est claire : il n'existe pas de solution unique ou universelle pour décarboner la pêche, mais une palette d'optimisations complémentaires, accessibles, éprouvées et adaptables. Grâce à l'approche progressive mise en œuvre dans ce projet – centrée sur la mesure, la simulation, et la coopération – il est désormais possible d'imaginer une transition énergétique réaliste, efficace et partagée pour la flotte artisanale.

- **Dans le cas d'un retrofit** (passage d'un moteur ABC usé à une hybridation parallèle combinant loi de conjugaison, optimisation énergétique et peak-shaving), les simulations réalisées sur le chalutier Naoned, instrumenté de capteurs et modélisé via le jumeau numérique **EcoBoatTwin**, ont permis d'estimer des **gains de consommation de carburant de 18 à 27%** selon les types de pêche (thon, merlu, fonds).
- **Sur les trois dernières années d'exploitation du Naoned, la réduction moyenne pondérée atteint 22 à 25%.**
- **L'apport intrinsèque estimé de l'hybridation parallèle** par rapport à un moteur neuf à régime fixe (avec la coque et l'hélice du Naoned) est de **12 à 14%**.
- L'optimisation ne s'arrête pas là, des pistes complémentaires peuvent être explorées, telles que :
 - un **co-dimensionnement de la chaîne propulsive globale**: choix du ratio du réducteur, du moteur thermique et de l'hélice via un plan d'expérience (DoE) sur une gamme de composants plus large, permettant l'optimisation de la composition de la chaîne propulsif pondéré sur les scénarios grâce à la **plateforme EcoBoatTwin**
 - le choix de **moteurs thermiques moins dynamiques mais plus efficaces** ; dans le cas d'une hybridation parallèle, la dynamique étant assurée par le moteur électrique
 - **une loi de pilotage de l'hybridation plus dynamique** (cf. Projet en cours avec les étudiants de l'IFP School)
 - l'intégration de **machine learning** pour adapter dynamiquement les points de fonctionnement en navigation.

- **L'optimisation du train de pêche, notamment du chalut de fond** (gain de 5% par rapport à l'existant) et des chaluts pélagiques, renforce encore l'efficacité globale du système.
- Au-delà des économies, l'hybridation parallèle offre :
 - **Zone NECA:** la possibilité de **réduire les émissions de NOx** jusqu'à 40% pour une surconsommation de carburants d'environ 5% (par rapport à l'hybridation standard)
 - une **traction plus régulière grâce une réactivité accrue de la chaîne propulsive**, améliorant la qualité et l'efficacité du travail de pêche, notamment dans la Houle. Cette dynamique ouvre des perspectives d'innovation, comme le **pilotage avancé des chaluts** (projet européen LIBFISH) sans surconsommation de carburant.
- **ROI « Série HYBA » du Surcout de l'hybridation parallèle par rapport une remotorisation conventionnelle :**
 - **Gain de consommation d'environ 18% par rapport à une remotorisation diesel conventionnel**
 - Surcout de la modification : env. 700k€
 - **ROI de 9 ans (sans subvention)**

L'une des grandes forces du projet réside dans son ****consortium unique****, réunissant pêcheurs, industriels, ingénieurs, architectes navals, scientifiques et institutionnels autour d'un objectif commun. Cette diversité de profils a non seulement permis d'aborder la décarbonation sous tous ses angles, mais elle a aussi favorisé un ****apprentissage collectif****, une montée en compétence partagée et un dialogue nouveau entre monde de la pêche et filières technologiques.

HYBA montre que le changement est non seulement possible, mais désirable : il crée de nouvelles expertises embarquées, stimule l'innovation, et donne aux professionnels les moyens d'agir en connaissance de cause. Ce projet prouve qu'en mobilisant les bons outils – données de terrain, jumeaux numériques, scénarios réalistes – et les bons partenaires, la transition devient une ****opportunité pour renforcer la performance, la résilience et la durabilité de la pêche française****.

Aujourd'hui, les conditions sont réunies pour passer à l'échelle : les outils sont prêts, les acteurs engagés, les retours techniques consolidés. HYBA propose ainsi un ****modèle reproductible**** pour d'autres segments de flotte, en France comme en Europe. Il incarne la transition non pas comme une contrainte, mais comme une dynamique vertueuse et collective, fondée sur la réalité métier et le progrès partagé.

Deux axes fondamentaux ressortent particulièrement des enseignements du projet HYBA et orientent clairement les suites à donner :

1. L'**hybridation parallèle** apparaît comme une **solution réaliste, robuste et pragmatique** pour les unités existantes. Elle permet de coupler un moteur thermique optimisé à un moteur électrique pour absorber les pics de couple, lisser les charges et améliorer la répartition énergétique, sans bouleverser l'architecture mécanique des navires. Cette configuration, flexible et reproductible, est particulièrement adaptée aux chalutiers côtiers ou semi-hauturiers et peut s'intégrer de manière progressive dans les flottes existantes.

2. Le simulateur **EcoBoatTwin** constitue aujourd'hui une base prometteuse pour accompagner la transition énergétique de manière agnostique, neutre et factuelle. Conçu pour modéliser différents scénarios de navigation, de gréement, et de motorisation, il permet déjà d'évaluer les effets de l'hybridation électrique sur les performances énergétiques. À terme, il pourrait intégrer d'autres solutions comme l'hydrogène, les carburants alternatifs (HVO, biogaz), ou les dispositifs véliques, afin de fournir une plateforme évolutive, ouverte et adaptable aux spécificités de chaque métier. Ce potentiel en fait un outil structurant pour construire des feuilles de route techniques et économiques partagées entre armateurs, concepteurs et financeurs.

Ces deux piliers – hybridation pragmatique et accompagnement numérique neutre – offrent une base solide pour une transition énergétique maîtrisée, progressive et inclusive du secteur de la pêche, et plus largement de l'ensemble des navires de travail en Europe.

22. Pourquoi faire le démonstrateur industriel HYBA Phase 2 ?

1. Répondre à une urgence économique et énergétique

Depuis 2022, la hausse et la volatilité du prix du gazole ont fortement dégradé la rentabilité de la flotte de pêche française, en particulier en Bretagne qui concentre près d'un tiers de la consommation nationale de gazole pêche ([doc 2], résumé exécutif). Cette situation, couplée à la pression réglementaire européenne sur la décarbonation, met en péril la compétitivité et la pérennité de la filière halieutique.

2. Apporter une solution pragmatique, reproductible et immédiatement mobilisable

La Phase 1 du projet HYBA a prouvé, via l'instrumentation du chalutier Naoned et la modélisation numérique (EcoBoatTwin), que l'hybridation parallèle en retrofit permet de réduire la consommation de carburant de 18 à 27% selon les types de pêche, avec une moyenne pondérée de 22 à 25% sur trois ans ([doc 1], résultats majeurs). Cette approche pragmatique :

- Modernise la flotte existante sans nécessiter de renouvellement total,
- S'adapte aux contraintes techniques réelles des navires,
- Est économiquement envisageable

3. Valider la performance en conditions réelles et industrialiser la solution

La Phase 2 consiste à intégrer le système hybride sur le Naoned et à valider les performances en exploitation réelle. Ce démonstrateur industriel :

- Confirmera les gains énergétiques et économiques observés en simulation,
- Permettra d'ajuster la solution aux réalités opérationnelles et de lever les verrous techniques restants,
- Servira de référence pour la reproductibilité de la solution sur d'autres navires et dans d'autres ports.

4. Structurer une filière innovante et souveraine

HYBA fédère un consortium régional et national (CRPMEM, Vectura System, APAK, chantiers navals, équipementiers, etc.), et s'inscrit dans une dynamique européenne en phase avec le Pacte Vert et les objectifs de décarbonation de la Commission européenne. Le démonstrateur industriel :

- Positionne la Bretagne et la France comme leaders de la transition énergétique maritime,
- Renforce l'attractivité de la flotte lorientaise,
- Crée des opportunités pour l'industrie locale et l'innovation (logiciels, équipements, formation).

5. Répondre aux attentes des financeurs, des institutionnels et des professionnels

Les échanges avec les ministères, les organisations professionnelles et les financeurs convergent : il est nécessaire de passer à la phase démonstrateur pour convaincre, lever les financements complémentaires et enclencher un effet d'entraînement sur la filière. La réussite de la Phase 2 conditionne l'accès à des co-investissements privés et publics, et permettra de valoriser les savoir-faire régionaux à l'échelle européenne.

6. En résumé

Faire le démonstrateur industriel HYBA Phase 2, c'est :

- Valider et industrialiser une solution innovante de décarbonation, adaptée aux réalités de la pêche française,
- Sécuriser l'avenir économique de la filière face à la crise énergétique,
- Positionner la Bretagne et la France comme pionniers de la transition maritime,
- Créer un modèle reproductible, exportable et soutenable pour la flotte européenne.

C'est un passage obligé pour transformer une innovation prometteuse en solution de filière, au bénéfice des armateurs, des territoires et de l'environnement.

23. Annexes

- Plan d'expérience et catalogue des scénarios de tests de base pour la journée de test de l'instrumentation du Naoned, le 17 juillet 2024

Annexe : Plan d'expérience et catalogue des scénarios de tests de base pour la journée de test de l'instrumentation du Naoned, le 17 juillet 2024.

Ce paragraphe constitue le livrable L.C.8.1 : Plan d'expérience, catalogues des scénarios d'exploitation et des signaux **WP-8 : Scénarios et Modes de fonctionnement**

WP-8 : Scénarios et Modes de fonctionnement
Partenaires impliqués : IMT Atlantique et Vectura System
Date de démarrage : t0 + 3 Durée : 3 mois
Travaux réalisés : - Construction de scénarios d'utilisation du chalutier à mener pour la campagne de mesures sur le chalutier - Préparation des plans d'expériences, catalogues des signaux à enregistrer ou à estimer.
Livrables : L.C.8.1 : Plan d'expérience, catalogues des scénarios d'exploitation et des signaux

Lors de la journée du 17 juillet 2024, correspondant à la remise à l'eau du Naoned suite à son instrumentation, des essais de base devaient être réalisés pour un double objectif ; valider les signaux enregistrés par certains capteurs, car les trajectoires suivies étaient maîtrisées, et valoriser ses signaux pour identifier certains paramètres du modèle du Naoned – au niveau de sa dynamique ou de son système de propulsion.

La plupart des essais demandés dans le plan d'expérience – reporté page suivante – ont été obtenus. Ils ont permis de détecter quelques défauts de calibration au niveau de certains capteurs, défauts corrigés de suite ou plus tard après un temps d'investigation. Les données ont été archivées avec les données en exploitation. Un exemple d'enregistrement (essai en « zig-zag ») est proposé à la Figure 42.

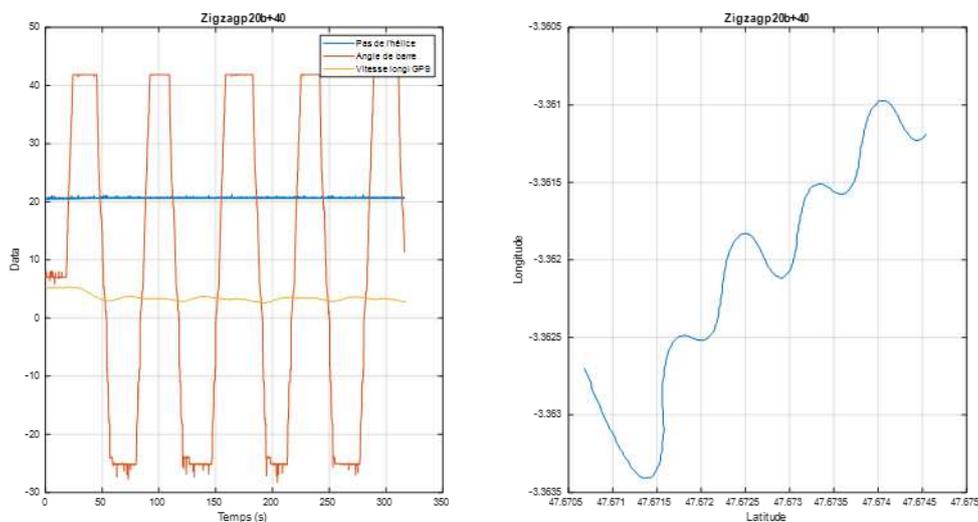


Figure 43. Exemple d'enregistrement lors des essais du 17 juillet 2024 ; test du "zig-zag".

Plan d'expérience : Essais standardisés

On cherche à évaluer certains paramètres du Naoned (coefficients hydrodynamiques, de l'hélice, du gouvernail, etc.). Pour cela, on veut solliciter le bateau dans différentes conditions, pour différentes valeurs de pas de l'hélice (ou de cran) et de l'angle de gouvernail.

On veut faire 5 types d'essais différents :

- Ligne droite
- Cercle
- Zig-zag
- Spirale

Pour chaque type d'essai, on a des valeurs de cran et d'angle de gouvernail. On a 55 tests à réaliser en tout :

		Ligne droite	Cercle						Zig-zag			Spirale
	Angle gouvernail (deg)	0	10	20	35	-10	-20	-35	+/-10	+/-20	+/-35	+/-35
Cran (%)	10											
	25											
	50											
	75											
	100											

Pour tous les essais :

- Pas de houle, ou le moins possible,
- Pas de vent, ou le moins possible,
- Pas d'autopilote.
- Aligner le bateau avec le courant, dans le même sens ou à remonter le courant peu importe, l'idée c'est de ne pas avoir de courant de travers.
- Noter les conditions de houle et le tirant d'eau ou bien la masse de carburant et de poisson.

Essai ligne droite

1. Conditions initiales : bateau à vitesse nulle, cran à 0, angle gouvernail 0°.
2. Mettre la valeur de cran prévue le plus rapidement possible. L'idée est d'avoir un effet OFF-ON.
3. Une fois que le bateau a atteint une vitesse d'avance constante, maintenir 1 minute.
4. Mettre la valeur de cran à 0 le plus rapidement possible.
5. Attendre l'arrêt total du bateau.

Essai à réaliser pour 5 valeurs de cran :

		Ligne droite
	Angle gouvernail (deg)	0
Cran (%)	10	
	25	
	50	
	75	
	100	

Essai cercle

1. Conditions initiales : mettre la valeur de cran prévue et angle de gouvernail 0°.
2. Attendre d'avoir une vitesse d'avance constante.
3. Mettre la valeur de gouvernail prévue le plus rapidement possible. L'idée est d'avoir un effet OFF-ON.
4. Une fois que le bateau a atteint une vitesse de rotation constante, maintenir 1 minute.

Essai à réaliser pour 5 valeurs de cran et 6 valeurs d'angle de gouvernail :

		Cercle					
	Angle gouvernail (deg)	10	20	35	-10	-20	-35
Cran (%)	10						
	25						
	50						
	75						
	100						

Essai zig-zag

1. Conditions initiales : mettre la valeur de cran prévue et angle gouvernail 0°.
2. Attendre d'avoir une vitesse d'avance constante.
3. Mettre la valeur de gouvernail le plus rapidement possible. L'idée est d'avoir un effet OFF-ON.
4. Attendre que le cap du bateau ai la même valeur que l'angle de gouvernail.
5. Mettre la valeur de gouvernail opposée le plus rapidement possible.
6. Attendre que le cap du bateau ai la même valeur que l'angle de gouvernail.
7. Répéter les opération 5 et 6 encore 5 fois.

Essai à réaliser pour 5 valeurs de cran et 3 amplitudes de gouvernail :

		Zig-zag		
	Angle gouvernail (deg)	+/-10	+/-20	+/-35
Cran (%)	10			
	25			
	50			
	75			
	100			

Essai spirale

1. Conditions initiales : mettre la valeur de cran prévue et angle gouvernail 0°.
2. Attendre d'avoir une vitesse d'avance constante.
3. Mettre la valeur de gouvernail le plus rapidement possible.
4. Lorsque que la vitesse de rotation est constante, réduire l'angle de gouvernail de 5°.
5. Répéter l'étape 4 jusqu'à atteindre l'angle de gouvernail opposé puis encore jusqu'à revenir à l'angle initial.

Essai à réaliser pour 5 valeurs de cran :

		Spirale
	Angle gouvernail (deg)	+/-35
Cran (%)	10	
	25	
	50	
	75	
	100	