

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 constater 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 identifiées 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)
<i>Powertrain modèle M1</i>			
$Q_m(t)$	Couple en sortie d'arbre moteur thermique (N.m)	$n_m(t)$	Vitesse de rotation du moteur thermique (tr/min)
<i>Powertrain modèle M2</i>			
$Q_{me}(t)$	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)		

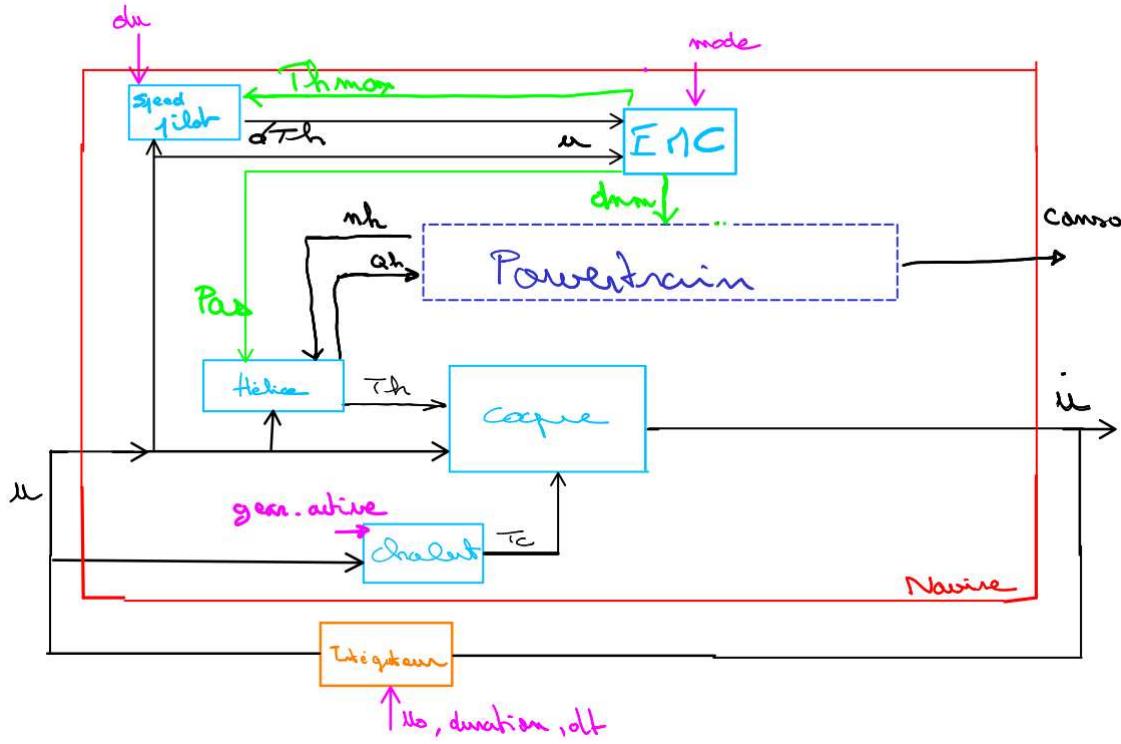


Figure 20. Architecture générale des modèles du Naoned - M1 (Diesel) ou M2 (Hybrid)

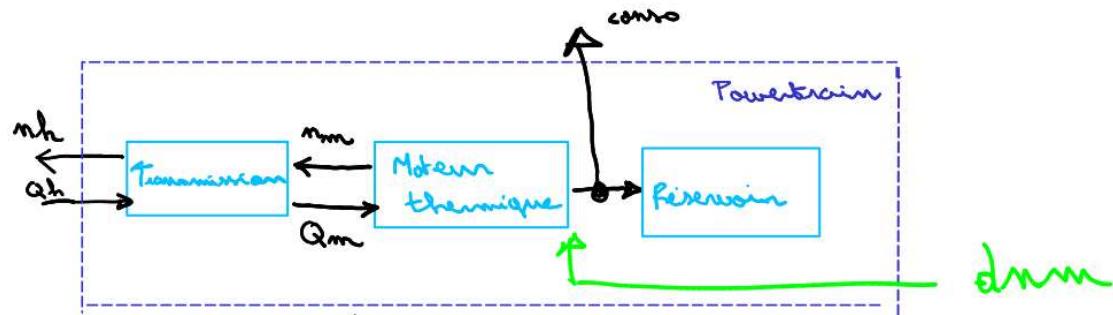


Figure 21. Modèle M1 - le powertrain repose sur le seul moteur thermique.

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 longitudinal du navire, on applique le Théorème Fondamentale de la Dynamique, pour obtenir l'équation suivant

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

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 ²[Fossen](#).

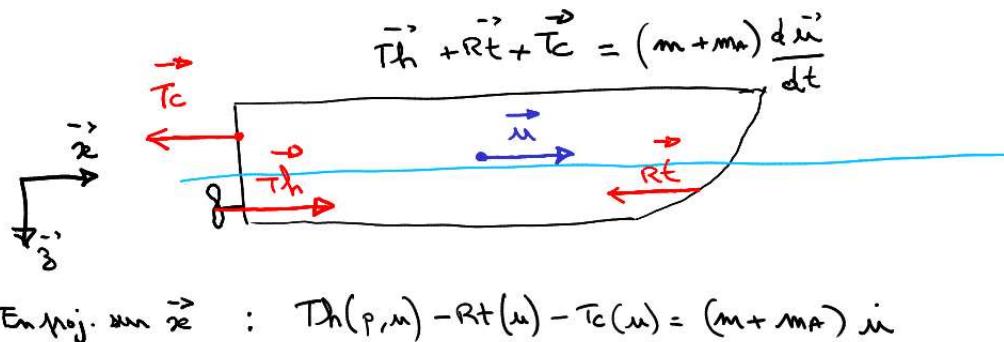


Figure 22. Modèle dynamique 1D de la coque

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)

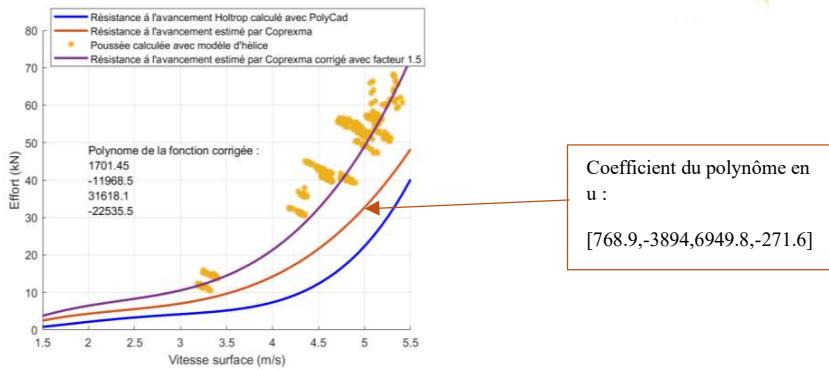


Figure 23. Courbe de résistance à l'avancement $R_t(t)$, modèle de Holtrop - Mennen

Pour la masse ajoutée, une formule semi-empirique simple peut être trouvé 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 inertuelle, 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 $(m+m_A)$ représente 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.

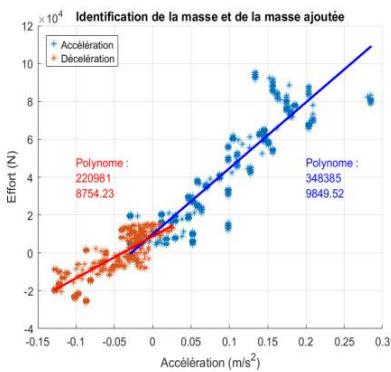


Figure 24. Identification de la masse et de la masse ajoutée par les mesures expérimentales.

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 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
$V_a(t)$	Vitesse du fluide qui traverse le disque de l'hélice ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$P/D(t)$	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)
$P_y(t)=60\text{kW}$ (filage), 180kW (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'entrainement 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 η_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 :

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

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 défini 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 .

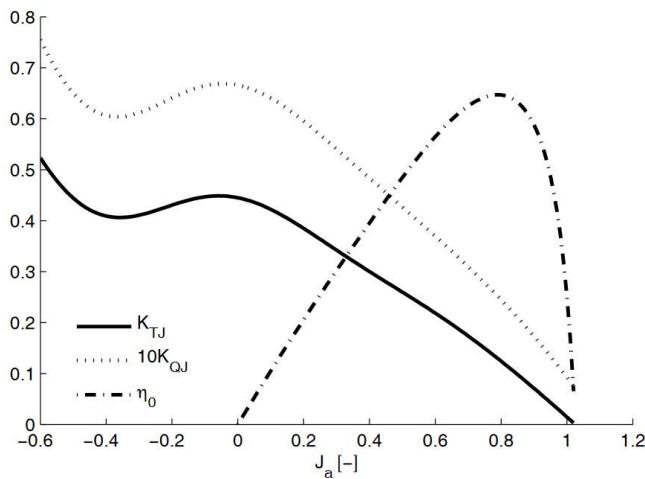


Figure 25. Exemple de coefficients K_T , K_Q et η_h pour une hélice donnée, à un pas fixé.

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.

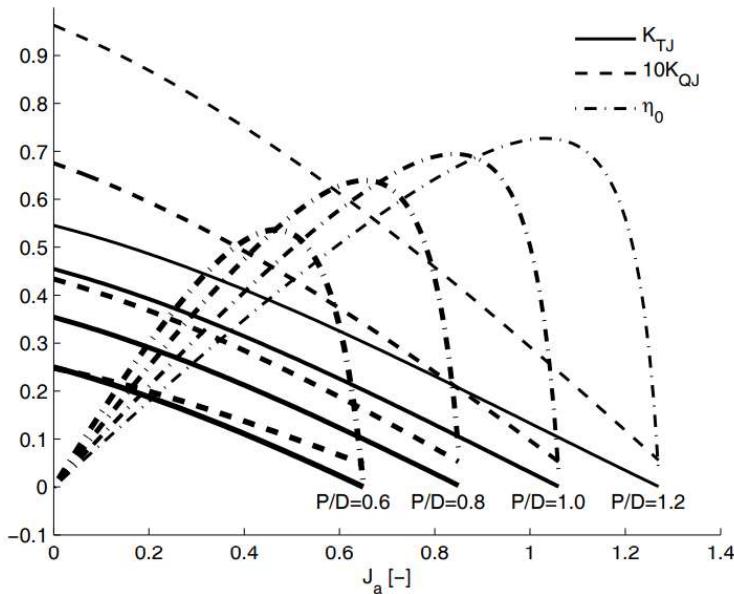


Figure 26. Exemple de coefficients K_T , K_Q , et η_h pour une hélice donnée, à pas variable.

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 croissant 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 succion). 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 .

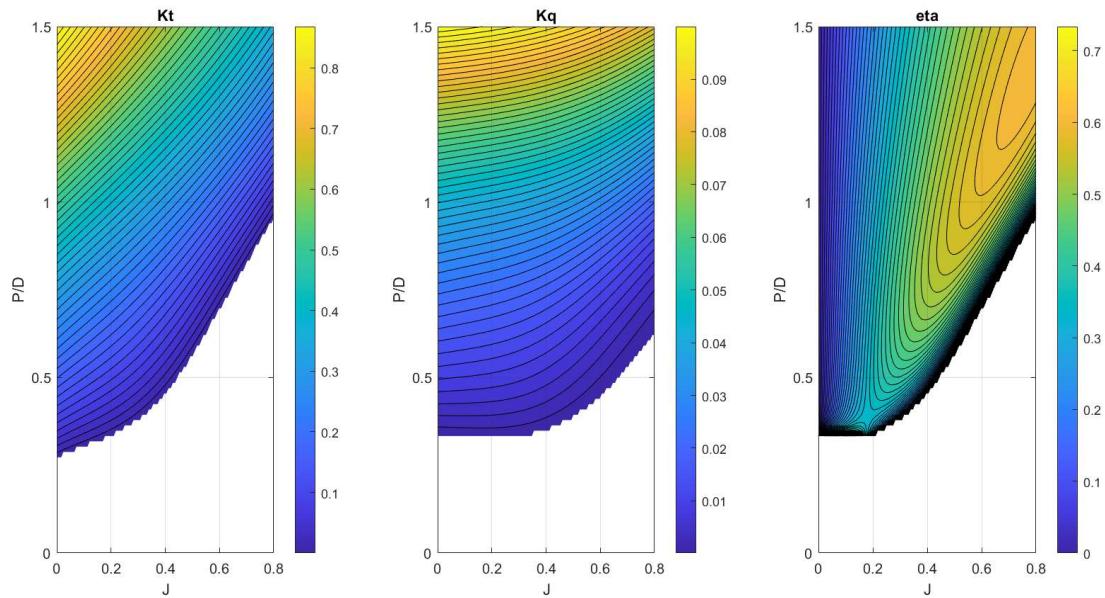


Figure 27. Cartographie type définissant intégralement une hélice à pas variable – courbe de l'hélice KA 4-55 équipant le Naoned.

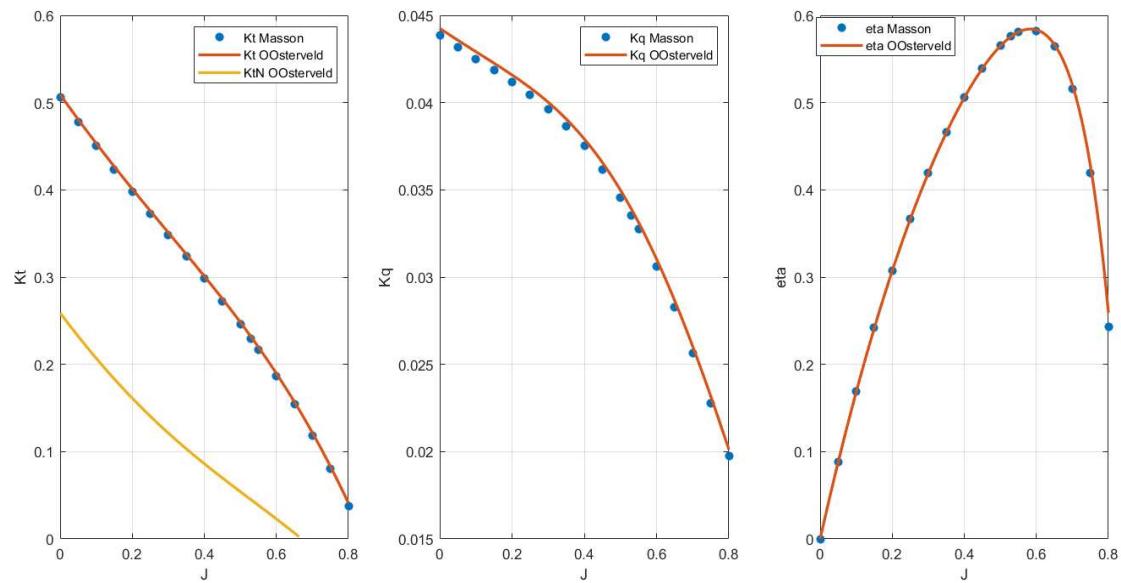


Figure 28. Modèle d'hélice KA 4-55 sous tuyère 19A. Comparaison des données fournies par Masson et des courbes déterminées à partir des coefficients issues de [Oos70].

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 [Oos70] ; 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 devrons 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.

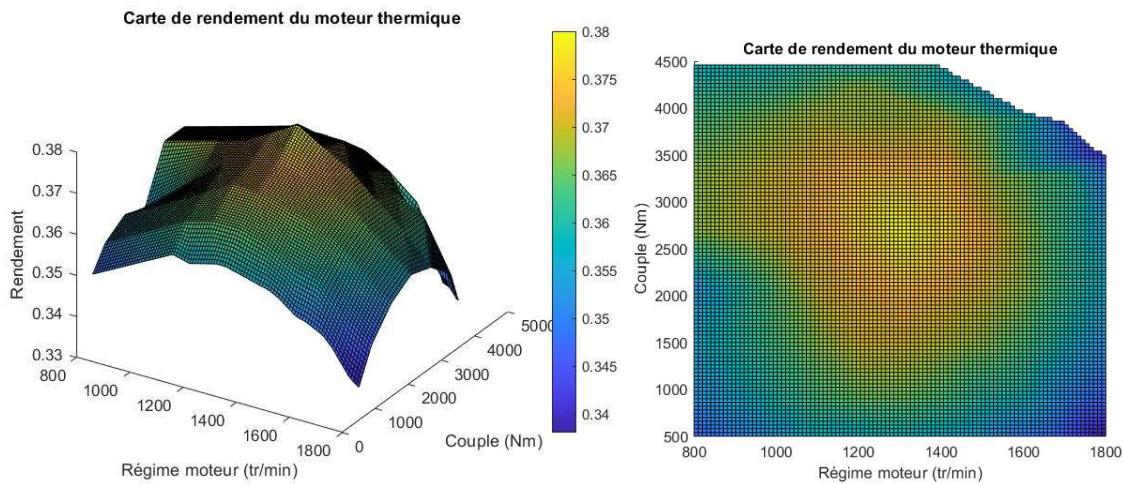


Figure 29. Cartographie en rendement du moteur thermique Mitsubishi® S652-T2MPTK

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.

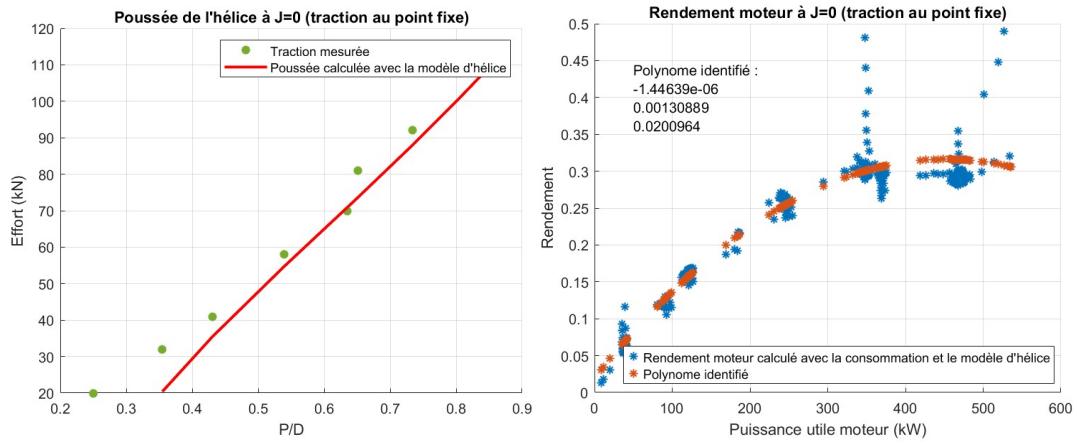


Figure 31. Poussée calculée avec le modèle de l'hélice (avec coef. de succion et de sillage) et mesure de traction (gauche) - Rendement moteur calculé avec la consommation mesurée et le modèle d'hélice (droite).

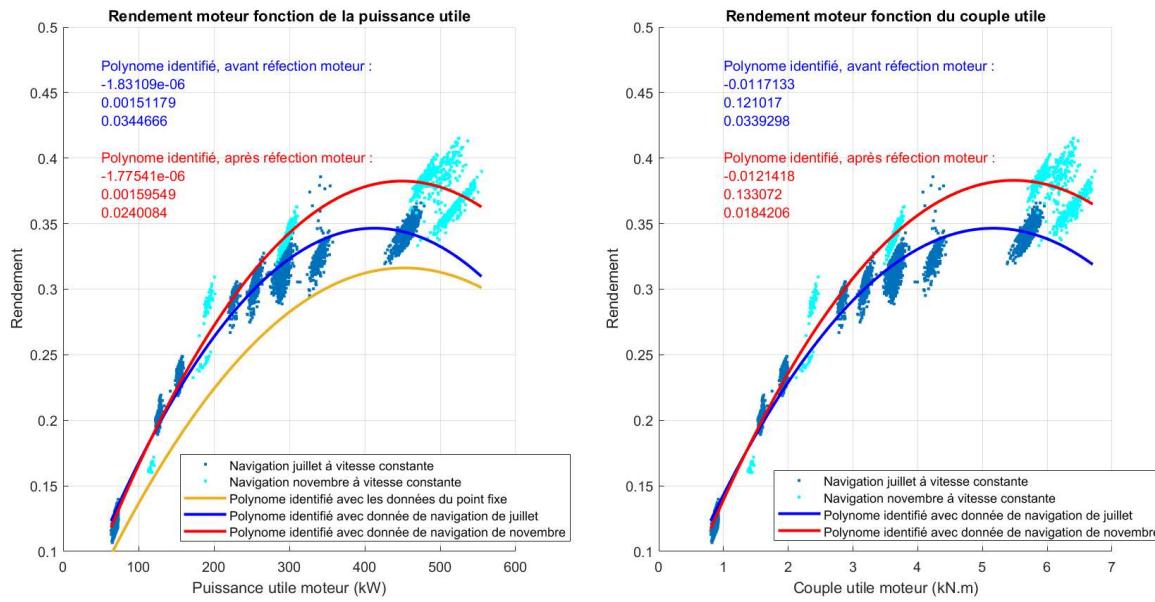


Figure 32. Calibration de la courbe de rendement du moteur sur la base des données en navigation ou en point fixe, avant et après sa réfection (juillet et novembre 2024).

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 tracées 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 réalisés, 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 :

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

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

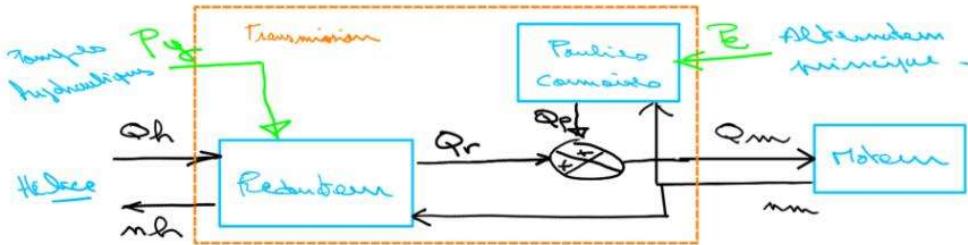


Figure 33. Schéma-bloc de la transmission du powertrain diesel.

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	2231	-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	-71,9	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 $n_{m_nom} = 750 \text{ tr/min}$, et transfert 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 (référencée par sa cartographie).

Concrètement, dans notre cas nous avons modulé les cartographies de rendement des moteurs thermiques comme celle présentées 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.

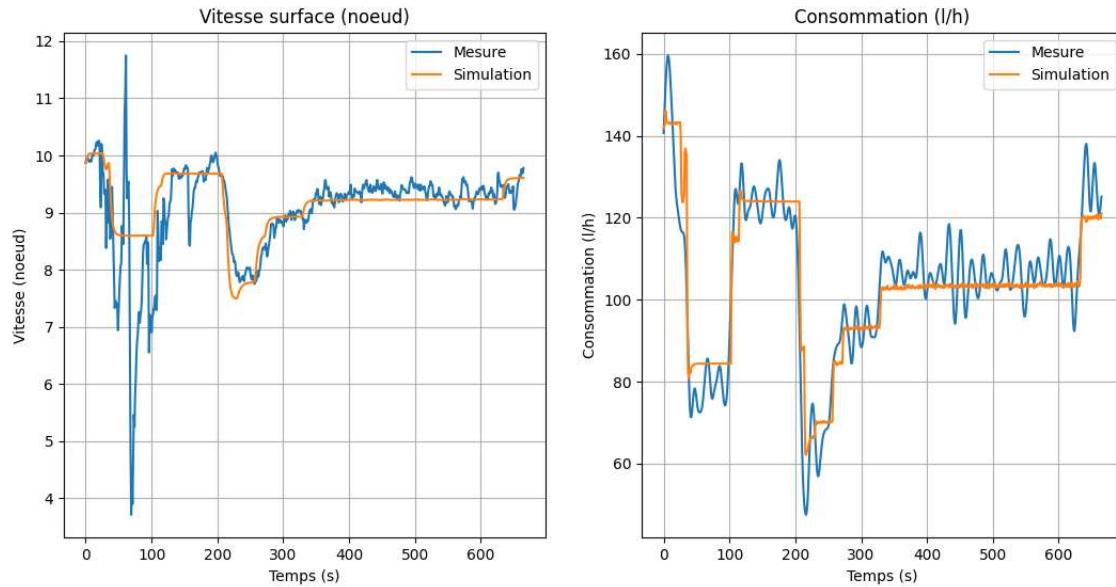


Figure 34. Simulation en navigation.

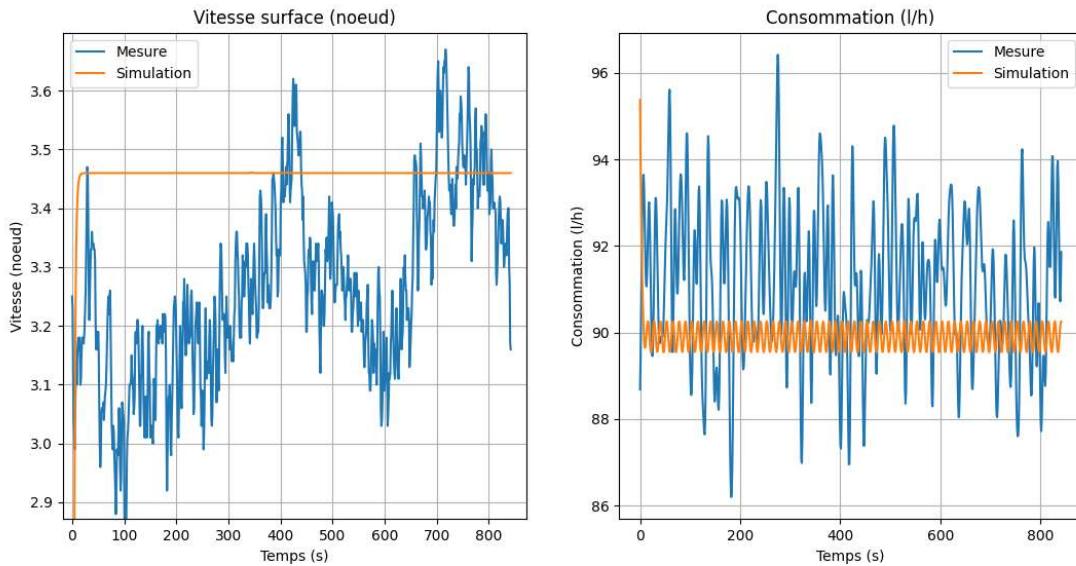


Figure 35. Simulation en pêche, pélagique au merlu.

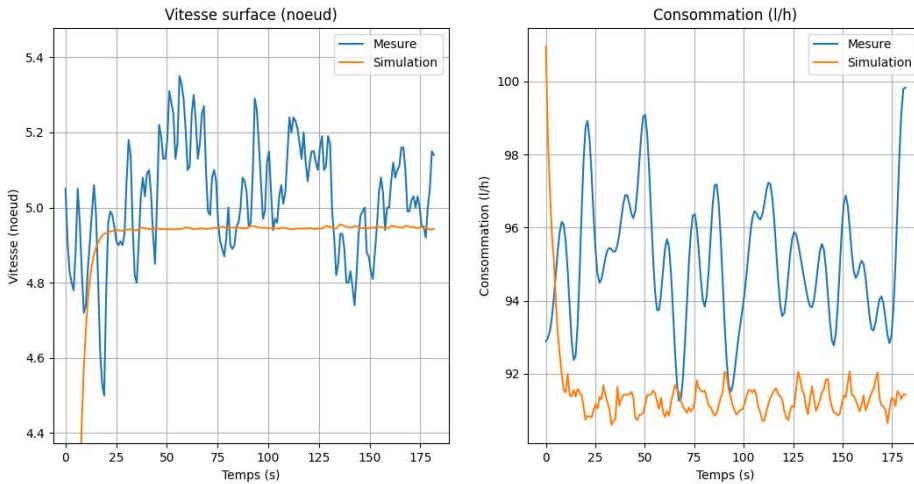


Figure 36. Simulation en pêche, pélagique au thon.

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 nœuds, on observe une consommation de l'ordre de 105 l/h. La Figure 38 témoigne de performances semblables avec le simulateur.

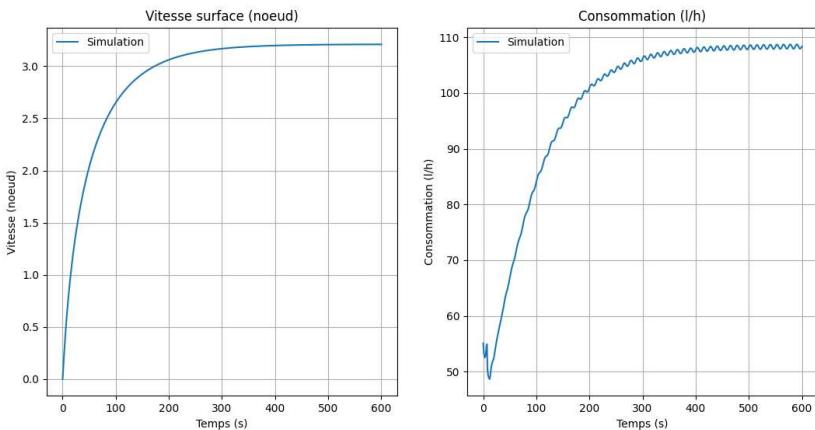


Figure 37. Simulation en pêche, chalut de fond.

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 appliquée 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
<ul style="list-style-type: none"> - 11% du temps à tracter le chalut, - 37% du temps à 0 noeuds, - 2% du temps à 3 noeuds, - 10% + 4% du temps à 6 noeuds, - 15% du temps 8 noeuds, - 17% du temps à 10 noeuds, - 1% du temps au filage, - 3% du temps au virage. 	<ul style="list-style-type: none"> - 45% du temps à tracter le chalut, - 22% du temps à 0 noeuds, - 1% du temps à 3 noeuds, - 5% + 4% du temps à 6 noeuds, - 9% du temps 8 noeuds, - 10% du temps à 10 noeuds, - 0.6% du temps au filage, - 3.4% du temps au virage. 	<ul style="list-style-type: none"> - 56.4% du temps à tracter le chalut, - 8% du temps à 3 noeuds, - 35% du temps entre 8 et 10 noeuds, - 0.3% du temps au filage, - 0.3% 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 Data Collectées

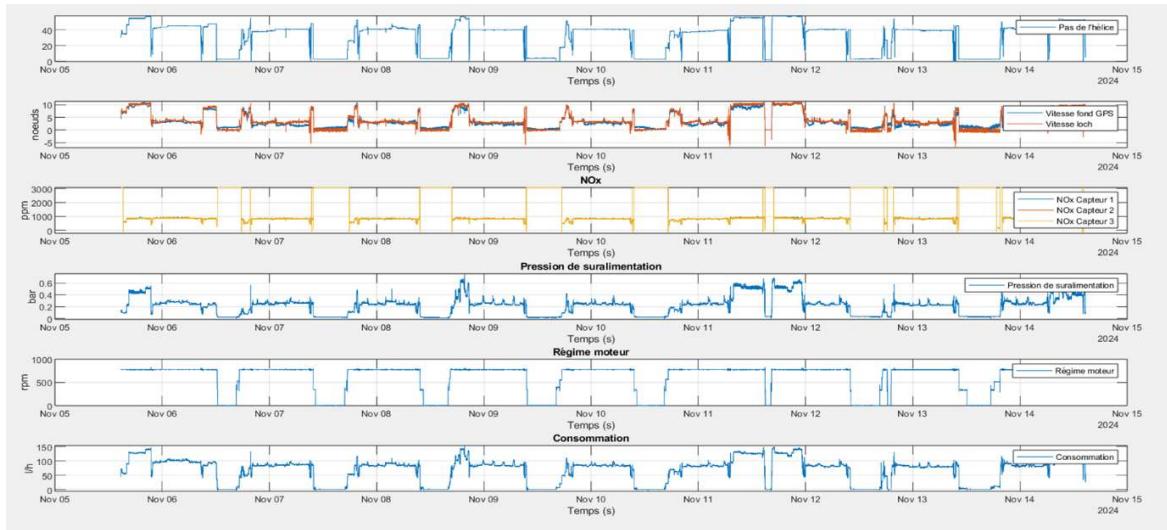


Figure 39. Extraits de datas brutes de plusieurs jours de pêche

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.

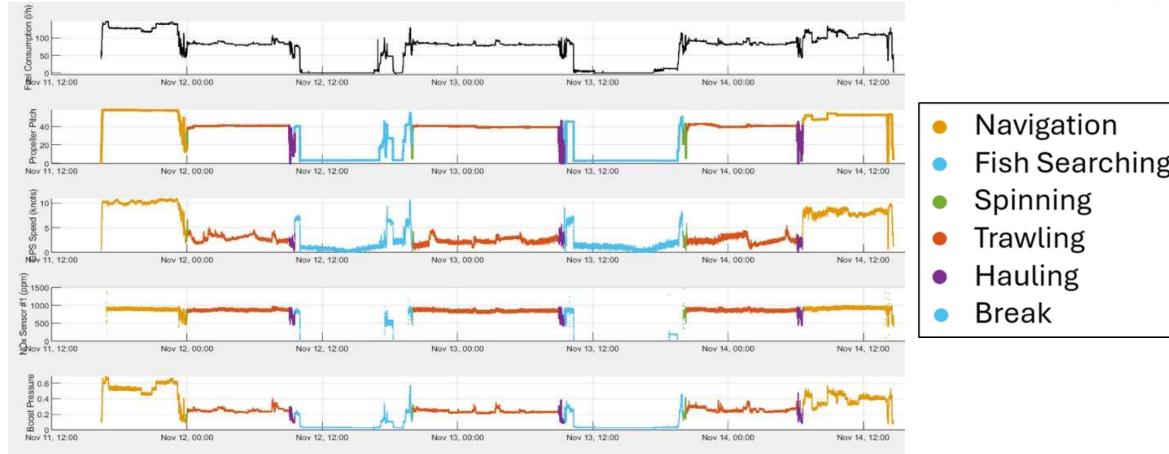
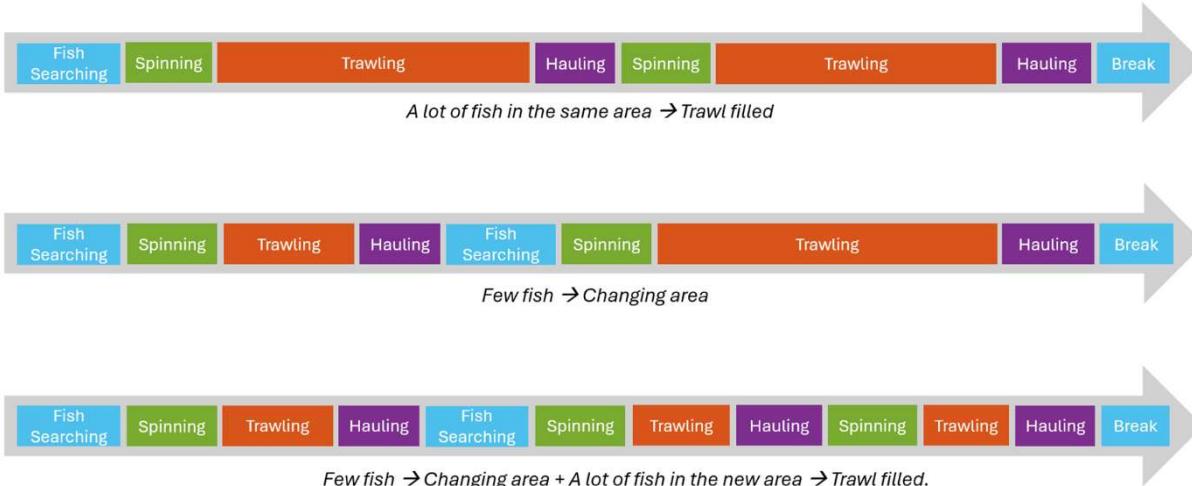


Figure 40. Mise en évidence des différentes phases avec un code couleur pour une meilleure visualisation

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



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.

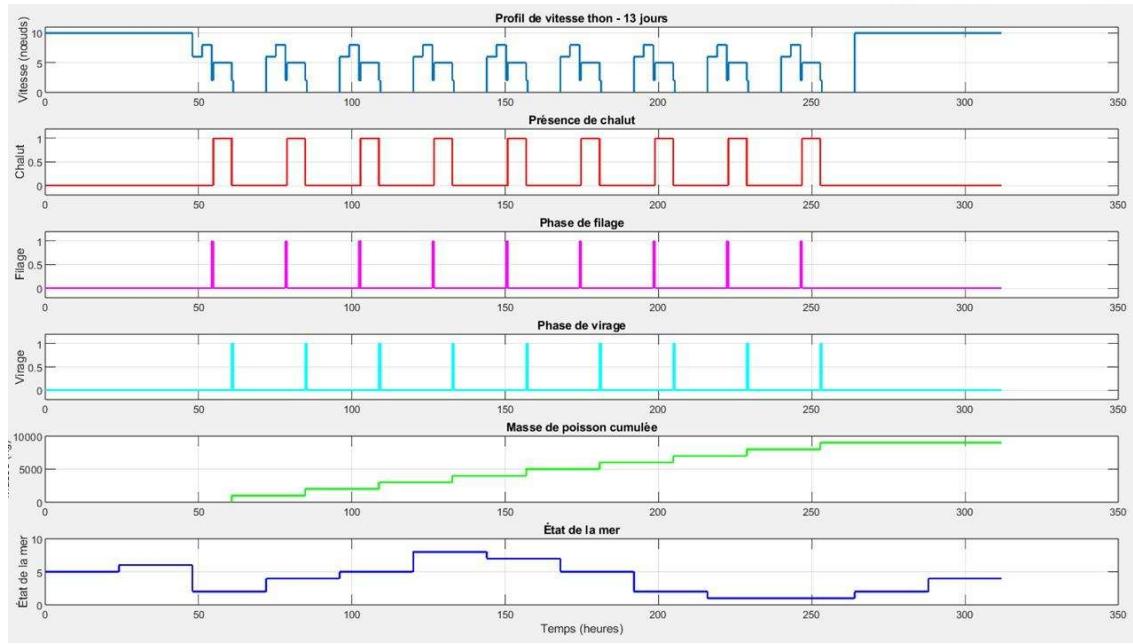


Figure 41. Scénarios « Pélagique Thon »

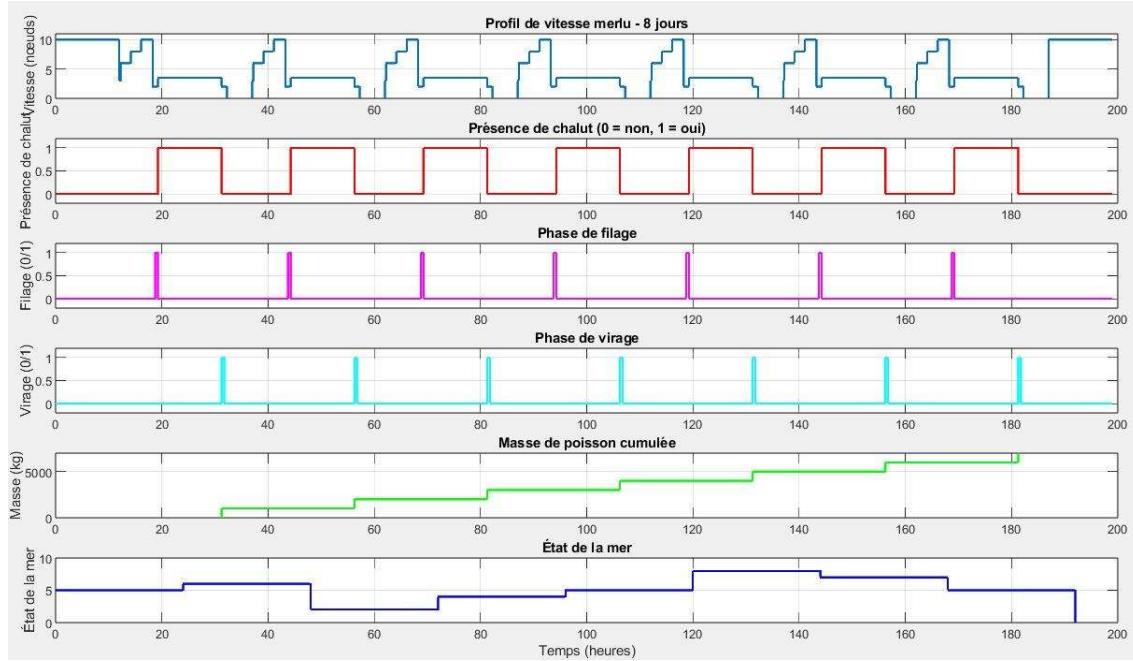


Figure 42. Figure 41. Scénarios « Pélagique Merlu »

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.

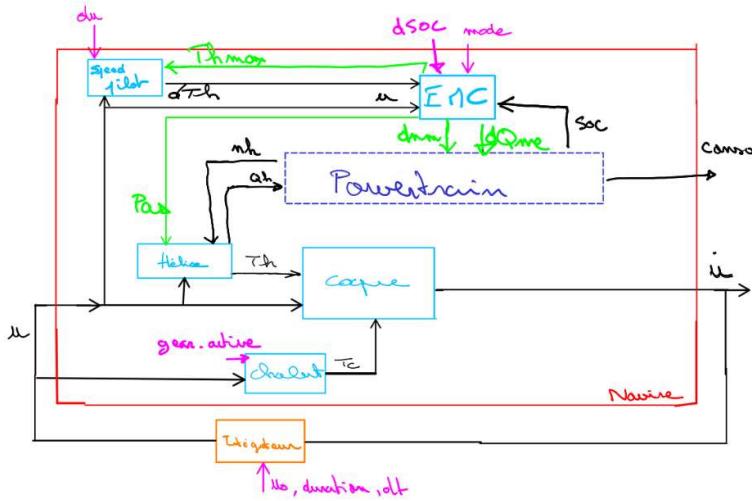


Figure 43. Architecture générale des modèles du Naoned, version M2 (Hybride) – ajout de certains signaux d'information liée à l'hybridation au niveau de l'EMC.

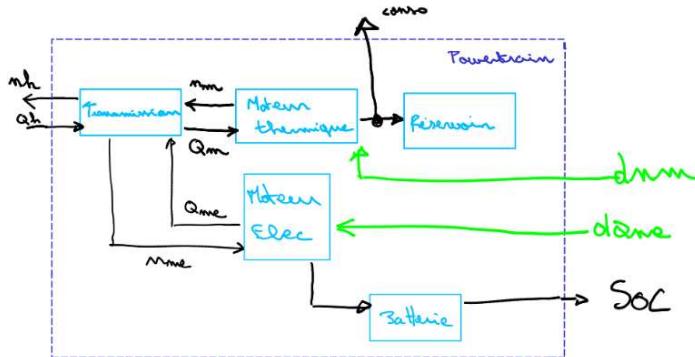


Figure 44. Schéma-bloc du powertrain hybride constitutif du modèle M2.

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.

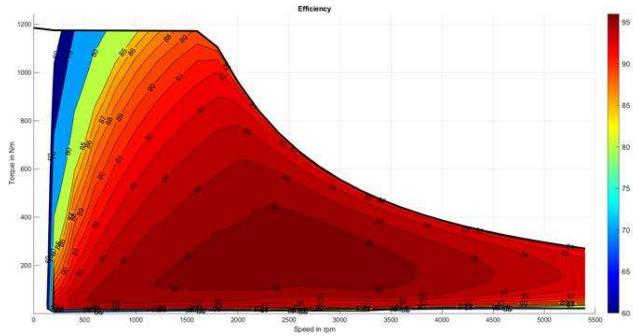


Figure 38. Exemple de cartographie d'un moteur électrique Bosch EMS - 16J20.

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.

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

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.