

La modélisation de la consommation au service du suivi des performances des porte-conteneurs

Sadok MALLEK

CMA CGM – CMA Ships / E&I Dept – Marseille (France)

SOMMAIRE

Les grandes variations du prix du combustible ainsi que la situation environnementale délicate ont remis en question la gestion interne de la quantité de combustible consommée par les transporteurs maritimes dans le monde. Ces derniers sont devenus de plus en plus soucieux de leurs émissions de gaz polluants.

Dans cette optique, CMA Ships, filiale du groupe CMA CGM en charge de la gestion de la flotte en propriété et des navires affrétés coque-nue, a lancé plusieurs projets en vue de contrôler et réduire la consommation de combustible de ses porte-conteneurs.

Dans le cadre de ces projets, un outil permettant de suivre la consommation journalière de combustible des navires a été développé en interne en 2012. Cet outil se base sur les données de navigation des navires pour construire des modèles théoriques de consommation.

Ce rapport présente les différentes étapes d'actualisation et d'amélioration de l'outil en se servant des données de navigation récentes. Le but final de ce travail est l'exploitation des modèles construits pour suivre les performances des navires en fonction des améliorations qu'ils subissent pendant leurs cycles de vie.

Sont présentés dans ce document, la démarche suivie pour élaborer l'outil, les hypothèses faites, les problèmes rencontrés ainsi que les différentes possibilités d'utilisation.

SUMMARY

The wide variations of fuel prices as well as the delicate environmental situation in the world have raised several questions about shipping companies' consumption of hydrocarbons. Greenhouse Gas emissions have since become an important monitoring factor of internal policies.

To tackle this problematic, CMA Ships, the CMA CGM subsidiary in charge of managing the fleet in property and bareboat vessels, has launched several projects to control and reduce the consumption of fuel of its container ships. These projects include a tool that follows the daily consumption.

This document presents the upgrade and update work carried out on the initial model released in 2012, based on recent voyage data. Afterwards, an application to determine the performances of the float ships during its life cycles was done.

This document presents the adopted approach, the assumptions made, the results obtained as well as the tremendous applications.

1. INTRODUCTION

Le besoin d'un outil pour suivre la consommation de combustible des navires en fonction des différents paramètres (vitesse, tirant d'eau, assiette, météo...) faisait le sujet de discussion de plusieurs départements dans CMA CGM ce qui a conduit le département Energie & Innovation à développer un outil de suivi de la consommation de combustible en 2012. Cet outil se base sur les rapports journaliers envoyés par les navires depuis 2010. En utilisant un outil de statistique pour filtrer et trier les données, des régressions multiples des données sont ensuite exécutées afin d'avoir des courbes théoriques de consommation en fonction de la vitesse (des courbes références).

Cet article présente en première partie l'actualisation du modèle (en utilisant les données de navigation récentes) et son amélioration en fonction des différentes optimisations effectuées sur les navires.

Dans la continuité de l'amélioration du modèle, l'optimisation de l'assiette constitue une bonne partie du travail demandé via l'exploitation des données de navigation afin de trouver une nouvelle méthode d'optimisation de l'assiette pour réduire la consommation et comparer les résultats des méthodes trouvées avec les calculs numériques qu'existaient pour quelques classes de navires.

Enfin, le modèle est validé par comparaison avec les courbes de consommation effectives, puis intégré dans les tableaux de bord qu'utilisent les différents opérateurs du groupe (Chartering (Département affrètement des navires), Bunkering (Département soutage), Superintendants (surveillants-responsables sur terre des navires) etc.).

2. LE MODELE DEVELOPPE

2.1. Présentation du modèle

Depuis 2009, le coût total d'achat de combustible de chaque année présente à peu près 30% du chiffre d'affaires annuel du groupe. L'optimisation du combustible pour les navires est donc une priorité pour CMA Ships ce qui a conduit le département Energie & Innovation en 2012 à créer un outil pour

suivre la consommation des navires: il s'agit d'un modèle théorique de consommation de combustible.

Ce modèle se base sur les données récupérées de la base VRB¹ (Base de données qui collecte les rapports journaliers des navires envoyés depuis fin 2008) ensuite grâce à un logiciel utilisé en statistique économique, les données en entrée sont filtrées puis des régressions multiples sont effectuées afin d'établir des équations et des courbes de consommation.

Ainsi, en fonction de cinq paramètres principaux : la vitesse par rapport au fond du navire, le tirant d'eau moyen, l'assiette, la force du vent et son secteur, ce nouveau modèle permet de calculer la consommation journalière de combustible du moteur principal. De plus, cet outil permet de voir l'influence des paramètres extérieurs (météo, chargement ...) sur la consommation.

L'importance du modèle réside dans la diversité de ses utilisations à savoir : les prévisions de la consommation au cours d'un voyage, suivi des performances des navires, anticipation des améliorations, routage, influence des paramètres extérieurs...

Pour expliquer le modèle développé, cette partie est basée essentiellement sur :

- Le rapport «Analyse économétrique de la consommation du moteur principal» élaboré par les deux intervenants Pierre CARIOU et François-Charles WOLFF expliquant la démarche suivie pour construire le modèle.
- Le rapport «Modélisation de la consommation en fuel des navires» écrit par CHARREL Martin dans lequel il détaille les différentes étapes pour l'élaboration du modèle
- La feuille de passation de Logan SPEYBROUCK dans laquelle il développe les éventuelles pistes d'améliorations.

¹ Vessel Reports on Board

2.2. Elaboration détaillée

L'élaboration du modèle se base essentiellement sur les données de navigation envoyées par le bord et un logiciel de statistique qui permet l'exploitation commode de ces données grâce à la variété des régressions disponibles, la possibilité d'appliquer des filtres ou d'effectuer des calculs d'erreurs. Il s'agit d'un outil rapide et précis pour le traitement des données surtout si le nombre d'observations est très important.

2.2.1. Préparation des données de navigation

Les données de navigations VRB envoyées depuis les navires sont collectées et mises à dispositions des différents opérateurs des départements dans des tableaux de bord en ligne depuis 2008.

Le rapport journalier d'un navire transmet aux équipes à terre plusieurs paramètres à savoir la consommation du moteur principal et des moteurs auxiliaires pour chaque type de combustible (HSFO, LSFO, DO), la vitesse, le tirant d'eau moyen, l'assiette, poids de la cargaison, vitesse et secteur du vent, puissance du moteur... Ces données sont envoyées chaque jour quelle que soit la position du navire (en mer ou dans le port), un tri des données est donc nécessaire, sans quoi le modèle risquerait d'être altéré à cause des valeurs de vitesse ou de consommation nulles correspondant à des périodes d'escales. De plus, le remplissage manuel du rapport couplé à une certaine négligence du bord se traduit parfois par la transmission de données aberrantes.

2.2.2. Construction du fichier exécutable

On peut décomposer le code en 3 parties : définition des variables, nettoyage des données et application des régressions.

2.2.2.1. Définition des variables

Une étude a été effectuée pour déterminer l'influence de chaque paramètre disponible dans le VRB, sur la consommation. Les paramètres les plus influents ont été retenus comme variable d'entrée du modèle à savoir, la vitesse par rapport au fond, le tirant d'eau, l'assiette, la vitesse du vent et son secteur.

Le choix de ces variables est en accord avec l'hypothèse d'indépendance exigée par le logiciel choisi pour faire les régressions.

Quelques paramètres n'ont pas été retenus comme la houle ou le courant. En effet, plusieurs études de sensibilité ont été faites démontrant la faible influence de ce dernier sur la consommation de combustible.. De plus, il n'est pas (ou mal) renseigné dans le VRB.

Pour les variables de la houle (hauteur et direction), les rapports journaliers n'avaient pas ces informations dès le début, et ce n'est qu'à partir de 2011 que les commandants ont commencé à mentionner ces variables dans les rapports d'où le problème de manque de données rencontré lors de l'intégration de ces paramètres dans le modèle. D'autre part, multiplier les paramètres dans le modèle mènera à la perte de précision et le rendra plus difficile à comprendre/exploiter. Donc, le choix du vent (vitesse et secteur) comme la variable météorologique principale paraît judicieux puisque les données liées au vent sont plus fiables que celles de la houle (par exemple mesurer la vitesse du vent à bord est plus facile que mesurer la hauteur des vagues (fait à l'œil et impossible pendant la nuit)) et sont disponibles depuis 2008 (Nombre de données plus important).

Après la validation du choix des paramètres, restent leurs définitions. En effet, dans le modèle, la vitesse et le tirant d'eau sont considérés comme variables continues, d'autre part, l'assiette, la vitesse du vent et son secteur comme variables discrètes (le choix de discrétiser l'assiette s'est imposé parce que les résultats des régressions avec l'assiette comme variable continue ont été inexploitable).

- Pour la vitesse du vent, l'échelle Beaufort était la base de discrétisation en utilisant 5 variables : wind_speed_1 (qui regroupe le vent de force 0 à 3 selon l'échelle), wind_speed_2 (force 4), wind_speed_3 (force 5) wind_speed_4 (force 6) et wind_speed_5 (qui regroupe le vent de force supérieure ou égale à 7). L'utilisation de ces regroupements a pour but de simplifier l'équation surtout que ces regroupements ont été

validés par les calculs (par exemple, la différence entre l'influence du vent de force 0 et celui de force 1 ou 2 est négligeable sur la consommation).

- Pour le secteur du vent, la discrétisation est faite sur cinq secteurs principaux (vent de face, travers, arrière, 3/4 face et 3/4 arrière). Pour ce faire, il fallait juste calculer la différence entre la direction du vent et la course du navire.

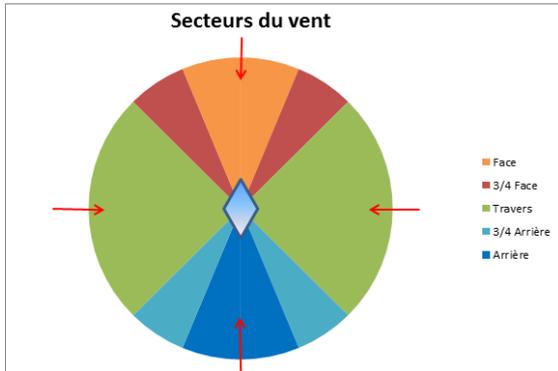


Figure 1: Les secteurs du vent sur le navire.

- Pour l'assiette, 4 variables qui représentent les quatre positions de l'assiette ont été fixées (2m By Stern, 1m By Stern, Even Keel et By Bow) comme le montre la figure ci-dessous.

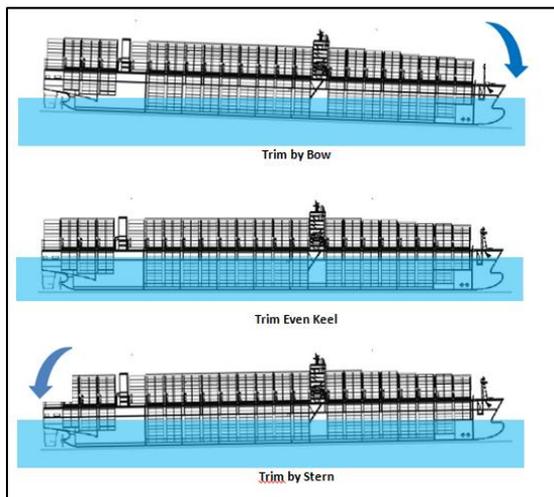


Figure 2: Les différentes configurations de l'assiette.

2.2.2.2. Nettoyage des données

Le filtrage des données est à posteriori une étape très importante dans la construction du modèle parce que c'est la qualité des observations utilisées qui déterminera

l'exactitude des résultats obtenus (on tend à diminuer les erreurs de calculs et de se rapprocher le maximum de la réalité) d'où l'application de quelques filtres afin d'éliminer les erreurs de saisies et d'augmenter la qualité des données finales à utiliser.

- Suppression des données de navigation ayant des erreurs de saisie (un des paramètres est nul ou la case correspondante est non remplie)
- Calcul du temps effectif de navigation et conservation des données ayant un temps compris entre 20 et 25h. (Un rapport est envoyé chaque jour à la même heure² donc on peut avoir un temps entre deux rapports de 23 ou 25 heures vu le décalage horaire puisque le navire se déplace). Alors les données où le porte-conteneur n'a passé que quelques heures en mer (l'arrivée à un port, ou un voyage entre deux ports voisins) sont éliminées dans le but de diminuer l'erreur relative de la quantité de combustible consommée, c'est-à-dire le relevé de la consommation est beaucoup plus fiable lorsque la quantité augmente sachant qu'on mesure la quantité de combustible consommée en tonne. La consommation est ramenée à 24 heures pour pouvoir faire ensuite la comparaison.
- Elimination des données avec un « Stopped time » pendant la navigation. En effet, des arrêts peuvent surgir et dans certains rapports le calcul de la vitesse moyenne ne prend pas en compte ce temps d'arrêt ce qui fausse la valeur de la vitesse.
- Suppression des données les plus extrêmes dues majoritairement à des erreurs de saisie : élimination de 0.25% des valeurs supérieures et inférieures pour la vitesse et la consommation.

² Heure locale

2.2.3. L'approche théorique

Soit C la consommation et V la vitesse, le modèle théorique repose sur l'estimation d'une fonction puissance :

$$C = \beta \times V^\alpha \quad (1)$$

On linéarise le modèle par transformation logarithmique :

$$\text{Ln}C = \text{Ln}\beta + \alpha \times \text{Ln}V \quad (2)$$

Ensuite, un terme d'erreur de moyenne nulle est rajouté pour obtenir l'équation ci-dessous :

$$\text{Ln}C = \text{Ln}\beta + \alpha \times \text{Ln}V + \varepsilon \quad (3)$$

Plusieurs calculs ont été menés pour trouver la variable correspondante à β , et c'est finalement le tirant d'eau qui est la deuxième variable la plus significative de la consommation avec l'ajout d'un autre facteur correctif γ devant le logarithme du tirant d'eau. L'équation de la consommation devient alors :

$$\text{Ln}C = \alpha \times \text{Ln}V + \gamma \times \ln T + \varepsilon' \quad (4)$$

2.3. Analyse et interprétation des résultats

2.3.1. Analyse des régressions

Pour déterminer les coefficients α , γ et ε' , une première régression est effectuée en restreignant les données par des conditions de références à savoir :

- De bonnes conditions météorologiques (mer calme): un vent de travers de force 0 à 3 Bf³ (supposé sans effet sur la consommation).
- Une assiette nulle (EvenKeel).

Ainsi l'équation obtenue calcule la consommation de combustible du moteur principal d'un porte-conteneurs pendant une journée en mer en fonction de sa vitesse et son chargement. Cette consommation est calculée pour des conditions de vent et de mer assez paisibles.

On ne choisit pas un navire pour cette première régression car cela limitera le nombre d'observations (sous l'hypothèse que tous les

navires de la série choisie consomment presque de la même manière).

Ensuite, dans une deuxième régression, les variables discrètes qu'on a déjà définies sont introduites (météo, assiette et nom du navire). Ces variables représentent la sur/sous consommation engendrée par rapport à la consommation de référence.

A part les coefficients α , γ et ε' , la deuxième régression fournit pour les variables indicatrices des coefficients traduisant l'écart par rapport aux valeurs de référence. En effet, le principe de la régression multiple utilisée est d'omettre les variables de référence sélectionnées au préalable (bonnes conditions météorologiques) et en résultats, des facteurs de variation par rapport aux valeurs références sont estimés. En outre, le calcul permet d'évaluer un pourcentage (positif ou négatif) proportionnel à la variation de la consommation entre deux configurations pour les variables discrètes (le vent, l'assiette et le navire). Par exemple, le modèle permettra de calculer le pourcentage de surconsommation d'un vent de force 5 Beaufort par rapport à un vent de force inférieure ou égale à 3 Beaufort ou encore la sur ou sous-consommation d'une assiette négative (ByStern) par rapport à l'assiette de référence (EvenKeel).

2.3.2. Interprétation des résultats

Voici un exemple de résultat pour la classe de navires 13800 EVP⁴ avec les cinq navires : CC Laperouse, CC Amerigo Vespucci, CC Christophe Colomb, CC Corte Real et CC Magellan). (Laperouse est choisi arbitrairement comme le navire de référence).

Source	SS	df	MS	Number of obs = 3357	
Model	666.255205	16	41.6409503	F(16, 3340) = 286.83	
Residual	49.0267477	3340	.014678667	Prob > F = 0.0000	
Total	715.281952	3356	.213135266	R-squared = 0.9315	
				Adj R-squared = 0.9211	
				Root MSE = .12216	

	coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
lspeed	2.416784	.012799	188.83	0.000	2.391689 2.441879
ldraft	.0486282	.0202928	2.40	0.017	.0088406 .0884157
bystern	-.0105157	.0052602	2.00	0.046	-.0020222 .0202892
bybow	-.0452146	.0065239	-6.93	0.000	-.0580058 -.0324235
wind_speed_2	-.0292606	.0056636	-5.17	0.000	-.04181562 -.0166656
wind_speed_3	-.0507822	.0060141	-8.44	0.000	-.0589906 -.0425738
wind_speed_4	-.0914604	.0070638	-12.95	0.000	-.0976107 -.0853102
wind_speed_5	-.2004761	.0082036	-24.44	0.000	-.2143914 -.1865607
wind_dir_1	-.0419107	.006404	-6.54	0.000	-.053545 .044669
wind_dir_2	-.0384713	.0063797	-6.03	0.000	-.0529627 .0509799
wind_dir_4	-.0700084	.006826	-10.26	0.000	-.083392 -.0566248
wind_dir_5	-.0960802	.0060287	-15.94	0.000	-.1079005 -.0842598
vespucci	.0306051	.0066608	4.59	0.000	.0175455 .0436647
colomb	.0232977	.0066293	3.51	0.000	.0102997 .0362956
cortereal	.0149423	.0068068	2.20	0.028	.0015963 .0282883
magellan	-.0102133	.0067275	-1.52	0.129	-.002977 .0234037
_cons	-2.30559	.0510389	-45.17	0.000	-2.405661 -2.205519

Figure 3: Résultat d'une régression.

⁴ Equivalent Vingt Pied est la référence caractérisant la taille d'un conteneur standard.

³ Echelle Beaufort

$$Conso = \left(1 + \sum_i (e^{\alpha_i} - 1) x_i \right) * e^{(constante + \alpha_{vitesse} * \ln(vitesse) + \alpha_{tirant\ d'\ eau} * \ln(tirant\ d'\ eau))}$$

(5)

Soient α_i les coefficients correspondant à chaque variable (les trois variables de référence prennent par défaut des coefficients nuls) et x_i des variables indicatrices telles que x_i vaut 1 si le paramètre i est sélectionné, 0 sinon. On obtient l'équation ci-dessus.

On peut faire une interprétation directe des coefficients calculés :

- Pour les deux variables continues, le coefficient a directement une interprétation physique : une augmentation de P % de la variable entraîne une augmentation de la consommation de $[(1 + P)^{\alpha_i} - 1]\%$ (où α_i est le coefficient correspondant à cette variable : vitesse ou tirant d'eau). Par exemple, 10 % de vitesse en plus engendre une surconsommation de 25 %. Autrement dit, prenant l'exemple d'un porte-conteneurs de capacité 13800 EVP, qui navigue par exemple à 15 nœuds et qui consomme 78 tonnes de combustible par jours⁵. Si sa vitesse passe à 16.5 nœuds (+10%) il voit sa consommation augmenter de 25% et passe à 99 tonnes par jour.
- Pour les variables discrètes, l'interprétation se fait par rapport à la valeur de référence initialement choisie. En effet, pour chaque variable muette, une fois sélectionnée, on a une sur ou sous-consommation de $[e^{\alpha_i} - 1] * 100\%$ (selon le signe du coefficient α_i). Par exemple, suivant le tableau de résultat, un vent de face engendre une surconsommation de 4,3 % par rapport à un vent de travers (Les coefficients des variables de référence sont nuls).

Après l'interprétation des régressions, il faut voir la qualité de ces régressions. En effet, il

⁵ Cette consommation correspondant à un tirant d'eau égal à son tirant de design, une assiette nulle et une mer calme.

faut voir au début le coefficient de régression R^2 , qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire, simple ou multiple. D'une valeur comprise entre 0 et 1, il mesure l'adéquation entre le modèle et les données observées.

De plus, pour chaque régression, l'outil de calcul effectue un t-test (statistique de Student) qui est présenté avec les résultats (coefficient « t »). Ce coefficient nous renseigne sur la significativité de la variable : un t de Student inférieur à 1,96 (intervalle de confiance à 95%) en valeur absolue implique que le paramètre associé n'a pas d'influence significative sur la consommation.

On trouve encore d'autres paramètres qui fournissent des indications sur la qualité des données, les écarts type, les erreurs etc. Seulement, le coefficient de corrélation R^2 et le coefficient « t de student » restent les plus importants à considérer.

Pour résumer, afin de trouver les facteurs des différentes variables, la démarche à suivre est :

- Précéder par une première régression, dans laquelle seules les observations contenant des variables discrètes de référence sont prises en compte (observations pour une mer calme et une assiette nulle) en vue de calculer uniquement les facteurs des variables continues pour obtenir la consommation en mer calme.
- Effectuer ensuite une deuxième régression pour calculer les facteurs des variables discrètes.

A la fin pour valider les calculs, trois critères importants ont été fixés lors de l'élaboration du modèle, à savoir :

- Un coefficient de régression supérieur à 0,9 ($R^2 > 0,9$).
- Un nombre d'observations supérieur à 200 ($Nobs > 200$).
- Un coefficient « t de student » supérieur à 1,96 ($t > 1,96$).

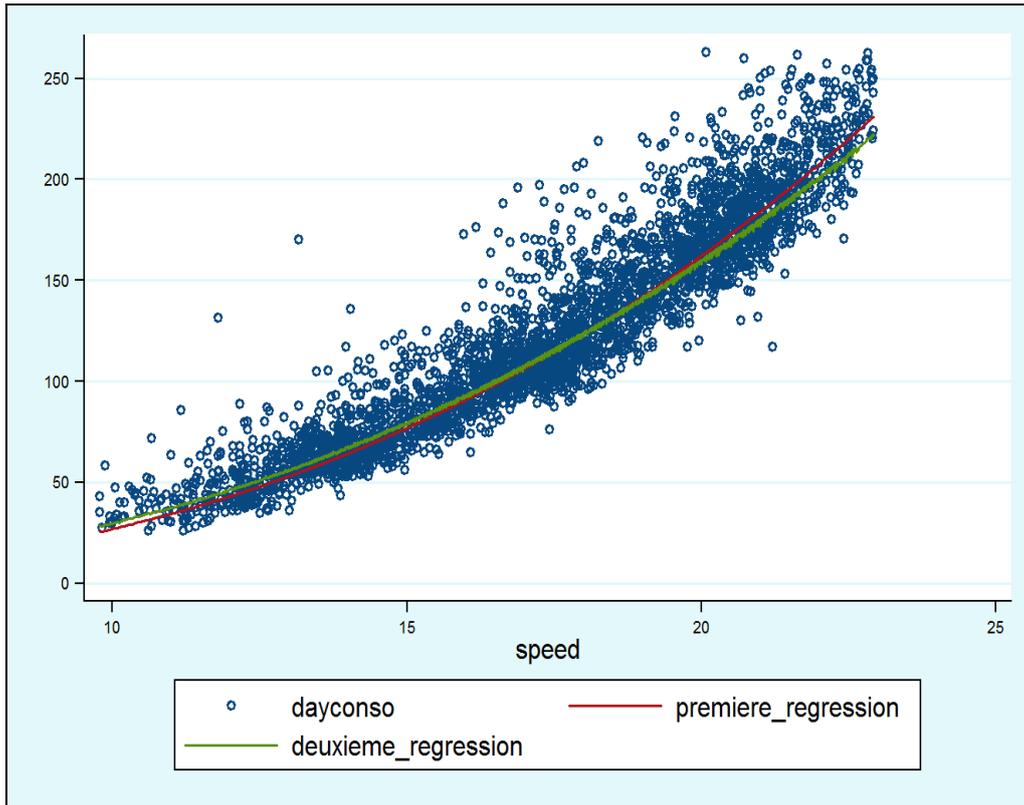


Figure 4: Les courbes de régression.

Toutefois, la première régression ne respecte pas toujours ces conditions, plusieurs problèmes apparaissent dus à la limitation des données (Quelques exemples de problèmes : le facteur du tirant d'eau est non significatif, le nombre d'observations est inférieur à 200 ou le coefficient de corrélation R^2 est faible). Dans ce cas, les facteurs des variables continues de la deuxième régression sont utilisés (pour cette régression, le nombre d'observations est généralement très important et les conditions fixées sont respectées). Pour cette régression, même avec un deux facteurs non significatifs dont le coefficient $t < 1,96$ (qui auront des valeurs nulles), le calcul sera validé si le coefficient R^2 est proche de 1.

Ainsi, on obtient tous les coefficients des variables d'entrée du modèle grâce aux deux régressions.

2.3.3. L'équation finale du modèle :

Après avoir effectué les deux régressions, l'équation du modèle s'écrit sous la forme :

$$Conso = \exp(Cte + \alpha_v \times \ln(V) + \alpha_{TE} \times \ln(TE)) \quad (6)$$

(Où Conso présente la consommation du moteur principal en combustible pendant 24 heures).

Ensuite, les facteurs de sur ou sous-consommation s'écrivent sous cette forme :

$$\beta_{Assiette} = \exp(\alpha_{Assiette}) - 1 \quad (7)$$

$$\beta_{Navire} = \exp(\alpha_{Navire}) - 1 \quad (8)$$

$$\beta_{Vitesse_Vent} = \exp(\alpha_{Vitesse_Vent}) - 1 \quad (9)$$

$$\beta_{Secteur_Vent} = \exp(\alpha_{Secteur_Vent}) - 1 \quad (10)$$

En finale, l'équation globale du modèle devient :

$$Conso = e^{(Constante + \alpha_{vitesse} \cdot \ln(vitesse) + \alpha_{TE} \cdot \ln(TE))} * (1 + \beta_{assiette} + \beta_{vitesse_v} + \beta_{secteur_v} + \beta_{navire})$$

(11)

3. AMELIORATIONS APORTEES AU MODELE

3.1. Les premières améliorations

Par rapport au modèle déjà développé, plusieurs modifications du code ont été nécessaires. Quelques légères améliorations faites ont été déjà évoquées dans la présentation du modèle. Par ailleurs, les changements ont été majoritairement structuraux vu l'évolution de la base VRB, d'autres ont été liés à la pertinence mathématique du modèle :

- Mise à jour des classes de navires en propriété (élimination des navires affrétés ou vendus et ajout des nouvelles classes avec les nouveaux navires construits)
- Elimination des données présentant des valeurs d'assiette démesurées en fixant un intervalle : [-2.5m - 1.5m].
- Pour la variable assiette, initialement discrétisée sur 3 variables indicatrices, l'ajout d'une quatrième variable s'avérait nécessaire en divisant la position « By stern » en deux variables selon l'amplitude de l'enfoncement en mètre. Alors, les quatre variables de l'assiette dans le nouveau modèle sont : « 1m by Bow – Even Keel – 1m by Stern – 2 m by Stern ». Ce sont les positions généralement prises par les porte-conteneurs.
- Modification des filtres des données. En effet, le temps de navigation acceptable pour les observations devient entre 16 et 25 heures afin d'augmenter le nombre de données pour les séries de navires qui comportent peu de navires.
- Elimination plutôt de 1% des données extrêmes au lieu de 0,25% afin de diminuer un peu plus l'écart type entre les deux régressions à basse et grande vitesse.
- Changement du navire de référence pour quelques séries parce que de préférence, le navire de référence doit être celui ayant le plus de données.

Pour quelques séries de navires qui naviguent presque tout le temps à une vitesse moyenne proche de 20 nœuds, il est judicieux d'éliminer les données dont la vitesse est inférieure à 16 nœuds puisque ces données faussent la régression. Alors, il faut prendre juste la fourchette de vitesse (entre 16 et 22 nœuds) pour effectuer les régressions (Exemple : la série 2200 EVP FORT – Figure ci-dessous).

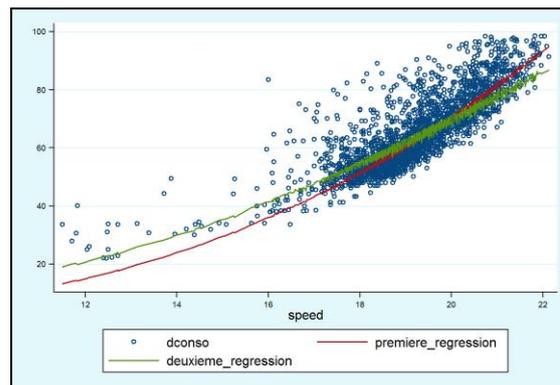


Figure 5: L'exemple des courbes de régression de la série 2200 FORT.

La majorité des problèmes rencontrés au niveau de la validation du modèle (coefficient de régression faible, non significativité de plusieurs variables, grande divergence entre les deux régressions) concerne les classes de navires de petite capacité (inférieure ou égale à 4400 EVP). En effet, pour ces navires, la quantité de combustible consommée est moins importante que celle pour les grands porte-conteneurs, alors les erreurs de mesure de la quantité de combustible consommée ou celle restante en soutes sont beaucoup plus importantes (autrement dit, l'erreur relative est bien plus supérieure que l'erreur absolue pour ces navires). De plus, l'effet des paramètres extérieurs comme la météo est beaucoup plus prononcé pour ces séries de navires d'où une grande dispersion des données et par conséquent des coefficients de régression bien inférieurs à 0,9.

Cependant, pour les séries de navires de capacité supérieure ou égale à 5100 EVP, les résultats ont été satisfaisants vu la faible dispersion des observations et le bon coefficient de corrélation.

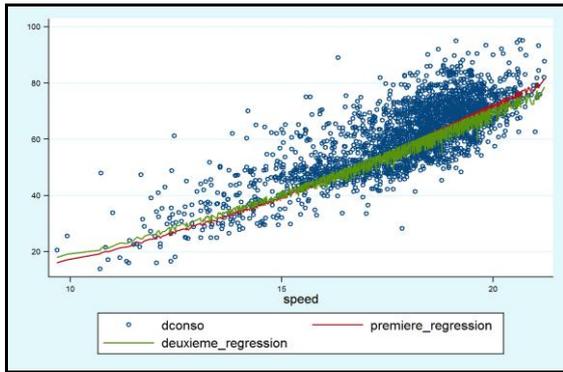


Figure 6: Un exemple de la dispersion des données pour les séries de petite capacité (Classe 1700 EVP).

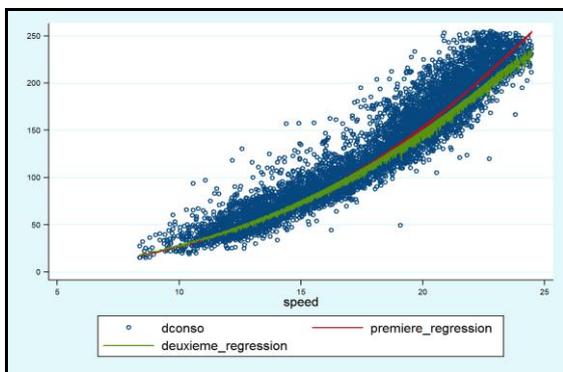


Figure 7: Un exemple de résultat d'une bonne régression ($R^2=0,9$ - Classe 11400 EVP).

3.2. Elaboration d'un outil de calcul

Afin de regrouper tous les résultats des régressions, un fichier de calcul est créé comportant :

- Une feuille, dans laquelle figure les facteurs des variables pour chaque classe de navires.
- Une feuille qui inclue la liste des navires à jour, et le coefficient correspondant pour chaque navire.
- Une feuille pour présenter les résultats sous forme de courbe de consommation journalière du moteur principal.

Dans la feuille de résultat, l'opérateur doit fixer cinq variables puis lancer les calculs. On obtient alors un tableau contenant les valeurs de la consommation en fonction de la vitesse, ensuite ces valeurs sont présentées sous forme de courbe.

Dans la même feuille, l'utilisateur a la possibilité de choisir un deuxième navire avec tous les autres paramètres, dans le but de pouvoir comparer entre deux navires. On peut aussi observer plus facilement l'influence de l'assiette ou de la météo sur un navire (en sélectionnant le même navire et des paramètres différents). De plus, dans le même fichier, les résultats de régression de l'ancien modèle ont été gardés, qui se basent sur des données du VRB pour une période de 2008 à 2012.

En résumé, grâce à l'outil, on peut d'une part, challenger chaque navire à son historique dans le but de suivre ses performances énergétiques. D'autre part, en variant les paramètres, et plus précisément l'assiette et le tirant d'eau, on peut trouver la configuration optimale pour une consommation minimale pour le navire en question.

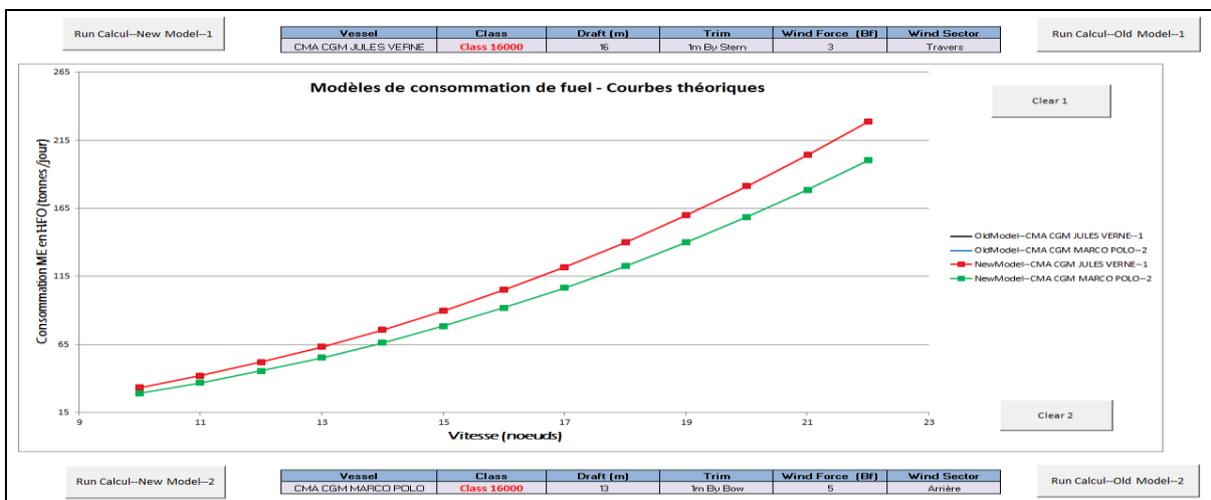


Figure 8: Feuille principale de l'outil de calcul.

3.3. L'optimisation de l'assiette – Trim Optimization

Outre la vitesse et le tirant d'eau, l'assiette joue un rôle très important dans les efforts liés à la résistance à l'avancement des navires. L'efficacité hydrodynamique peut alors significativement varier en fonction de l'assiette. Donc, en fonction de la vitesse et du tirant d'eau, on peut définir une assiette optimale qui correspond à un minimum de consommation.

L'application d'une assiette optimale ne doit en aucun cas être au détriment de la sécurité du navire et son équipage. Dans la mesure où c'est possible, avec un minimum de ballast, la navigation en assiette optimale peut aboutir à des réductions de combustible de 1 à 4%.

Les essais en bassins d'un porte-conteneurs comportent une partie pour l'optimisation de l'assiette. A vitesse et tirant d'eau fixés, ces calculs nous fournissent la variation de la consommation en fonction de l'assiette et le gain estimé en pourcentage en prenant pour chaque configuration (couple vitesse et tirant d'eau) la consommation à assiette nulle comme référence.

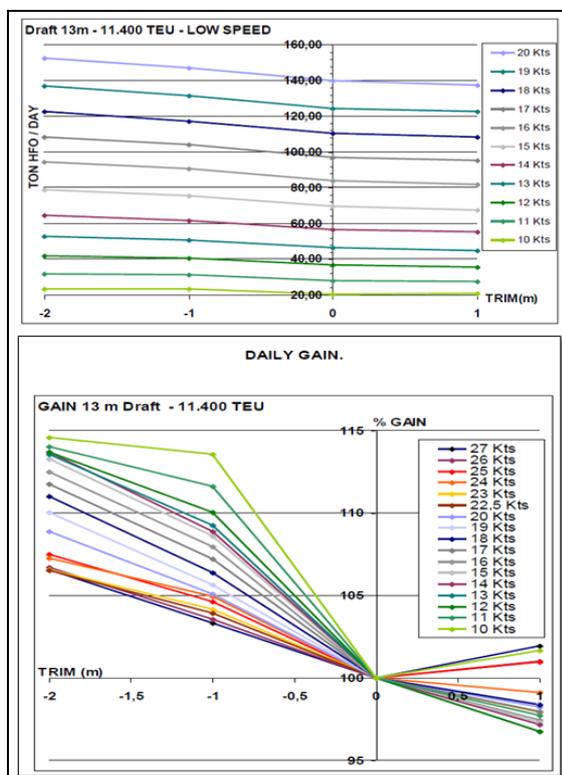


Figure 9: Exemples des résultats issus des essais en bassin (Classe 11400 EVP).

Dans le modèle développé, l'assiette prend un coefficient fixe indépendamment des autres paramètres. Néanmoins, en réalité, l'assiette optimale dépend considérablement de la vitesse et du tirant d'eau.

Vu l'importance de l'assiette dans la réduction de la consommation, il était judicieux d'effectuer des travaux d'optimisation afin de faire évoluer le modèle pour une meilleure prise en compte de l'assiette. Ces études ont été basées sur les 3 plus grandes classes de navires (11400, 13800 et 16000 EVP) parce que pour ces classes, on trouve les documents des essais en bassin avec des calculs sur une plage de vitesse 10 - 22 nœuds. Les navires de ces classes ont été construits au cours ou après l'adoption du Slow Steaming (navigation à vitesses réduites depuis 2009). Pour les séries de navires plus anciennes, les calculs ont été effectués pour des vitesses supérieures ou égales à 20 nœuds (20 – 27 nœuds).

Ces études consistaient à chercher une méthode de calcul permettant de déterminer l'assiette optimale à partir des données de navigation. La méthode sera ensuite validée ou pas via la comparaison entre les résultats des essais en bassin de l'optimisation de l'assiette et les résultats de cette méthode.

Initialement, l'idée était de se servir des données VRB pour voir la variation de la consommation réelle en fonction de l'assiette en utilisant une simple régression linéaire. Mais ce n'était pas la bonne solution vu la grande dispersion des points. Et même avec une consommation corrigée (moyenne de la consommation réelle et la consommation théorique issue du modèle) la dispersion a persisté. En effet, se limiter à une vitesse et un tirant d'eau fixe limite beaucoup les données ; parfois les données sont concentrées seulement autour d'une assiette nulle sans avoir des points pour une assiette négative ou positive. Ces problèmes ont poussé à changer la méthode utilisée.

Alors, le type de régression a été modifié en utilisant la régression multiple, en ajoutant d'autres paramètres (vitesse, tirant d'eau etc.) et en considérant cette fois l'assiette comme variable continue. Les résultats des régressions étaient incorrects. En effet, c'était prévisible parce que le même calcul avec des données différentes a été fait pendant la construction

théorique du modèle sans résultats satisfaisants.

Finalement, la méthode actuelle du modèle est reprise, avec une assiette divisée en 4 variables indicatrices pour les 4 positions. Cette méthode a été légèrement modifiée au niveau du coefficient de l'assiette en le discrétisant plus. En effet, vu que l'assiette dépend de la vitesse et du tirant d'eau, l'assiette a été discrétisée suivant deux zones pour la vitesse (17- 18 nœuds comme frontière) et deux zones pour le tirant d'eau (le tirant d'eau de design comme frontière) comme suit :

Zone de Vitesse / Tirant d'eau	Vitesse Réduite (12 - 17 nds)	Grande Vitesse (18 - 23 nds)
Inférieur au TE de design	4 variables	4 variables
Supérieur au TE de design	4 variables	4 variables

Table 1: Les quatre zones de discrétisation de l'assiette.

Ce choix de zone est basé sur les résultats théoriques de l'optimisation de l'assiette parce que généralement, l'assiette optimale ne change pas dans chaque zone (hypothèse de travail).

Donc, tous les calculs de modélisation ont été refaits avec la nouvelle configuration de l'assiette discrétisée sur 16 variables (4 zones × 4 positions). Pour chaque zone, la position ayant le plus petit coefficient correspondra à l'assiette optimale.

Néanmoins, plusieurs problèmes liés majoritairement à la grande discrétisation sont apparus : manque ou absence de données pour quelques configurations, la non significativité des variables ...

Compte tenu de la grande discrétisation, seules deux zones du tirant d'eau ont été retenues et la dépendance en vitesse a été omise. Ce choix est encore osé mais justifié parce que l'assiette optimale dépend en premier temps du tirant d'eau. Les résultats pour les 8 facteurs de l'assiette sont meilleurs que les précédents (on a moins de facteurs manquants). Ils sont en concordance avec les résultats des essais en bassin. Ainsi, la méthode est validée.

Même si la méthode développée a été validée, elle ne fournit pas l'assiette optimale avec la bonne précision requise pour quelques classes et surtout pour les classes de faible capacité. Ce qui a poussé le département E&I à demander des études de simulations CFD de Trim Optimization en sous-traitance à HydrOcean pour une plage de vitesse inférieure à 20 nœuds et une plage de tirant d'eau centrée sur le tirant d'eau de design.

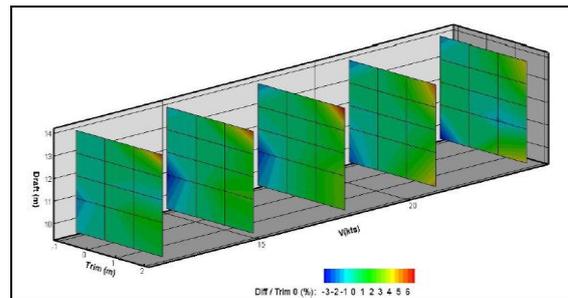


Figure 10: Présentation des calculs numériques de l'assiette optimale (HydrOcean).

En se basant sur ces calculs (sous l'hypothèse : la puissance effective du moteur et sa consommation sont proportionnelles) et des résultats des essais en bassin, un travail de correspondance entre ces calculs et l'équation du modèle a été fait pour avoir à la fin des coefficients théoriques pour l'assiette dans le modèle. Ces coefficients renforceront l'exactitude du modèle.

In fine, le but de ce travail est de mettre à jour les tables d'instructions qui détaillent les différentes configurations de l'assiette optimale, fournies aux commandants des navires.

8500 TEU - CMA CGM OTELLO NABUCCO TOSCA								
SPEED (kts) / DRAFT (m)	12	13	14	15->18	18->21	22	23	24
9.5	1 m by Bow							
11	1 m by Bow						EK	1 m by Stern
12	1 m by Stern	EK	1 m by Bow			EK	1 m by Stern	
13	1 m by Bow		EVEN KEEL					
14	1 m by Bow							

Table 2: Exemple d'une table détaillant l'assiette optimale fournie aux navires (Classe 8500 TEU).

4. EXPLOITATION DU MODELE POUR SUIVRE LES PERFORMANCES DES NAVIRES

4.1. Les solutions mises en place pour réduire la consommation

Dans un contexte mondial où le prix du combustible ne cesse de varier considérablement, les armateurs mondiaux ont adopté stratégiquement plusieurs solutions en vue de diminuer la consommation des navires en et alors de l'émission des gaz polluants, aux dépens parfois du temps des traversées et du moteur principal. L'amélioration des performances énergétiques et écologiques des navires est devenue une priorité pour les transporteurs maritimes vu l'énorme impact du coût de l'énergie sur leurs résultats financiers.

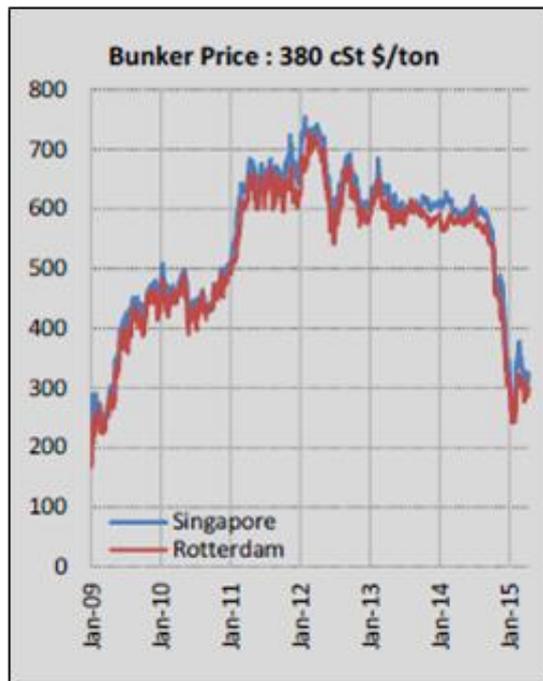


Figure 11: Prix du combustible utilisé pour les porte-conteneurs (Source Alphaliner).

4.1.1. Le Slow Steaming

Le Slow Steaming est une nouvelle politique adoptée par la majorité des armateurs à partir de la crise économique de 2008, qui consiste à la réduction de la vitesse de navigation via la diminution de la puissance utilisée du moteur du navire dans le but de diminuer la consommation de combustible et par conséquent le coût de transport.

A CMA Ships, le Slow Steaming est divisé en deux volets :

- Slow Steaming (SS) : avec une vitesse du navire inférieure ou égale à 20-21 nœuds et une charge du moteur inférieure ou égale à 40% de sa charge nominale.
- Super Slow Steaming (3S) : avec une vitesse du navire inférieure ou égale à 16 nœuds et une charge du moteur inférieure ou égale à 15% de sa charge nominale.

Cependant, cette stratégie exige des contraintes supplémentaires surtout si les armateurs cherchent à maintenir leurs fréquences hebdomadaires ce qui les obligent à ajouter de nouveaux navires. Du coup, la quantité de combustible économisée est à revoir avec les coûts additionnels des navires ajoutés. De plus, des craintes techniques liées à la machine sont à prendre en considération puisque la majorité de la flotte est sortie avant l'adoption du slow steaming. On peut prendre comme exemple les moteurs des navires, qui sont conçus pour naviguer à vitesse supérieure à 20 nœuds, alors des actions de prévention sont à mettre en place afin d'éviter les avaries (encrassement des turbos, usure corrosive des chemises, la mauvaise combustion...).

4.1.2. TurboCharger Cut Out

C'est la première conséquence du Slow Steaming. Il s'agit d'un système qui permet aux commandant et chef mécanicien à bord d'avoir la possibilité de désactiver l'un des turbocompresseurs du moteur principal pour fonctionner à faible charge. Alors, le rendement des turbocompresseurs ainsi que du moteur s'améliorent et donc la consommation diminue (gain entre 3 et 4 % de combustible).



Figure 12: Le TurboChargerCut Out

Ce système rend le Slow Steaming beaucoup plus souple à adopter avec une meilleure efficacité, tout en évitant les avaries du moteur dues à la réduction de la vitesse.

4.1.3. Le changement de bulbe

Le changement de bulbe est une autre conséquence du Slow steaming. Les bulbes des navires, dont les formes ont été dessinées avant la mise en place du slow steaming, présentent un point d'optimisation aux conditions de design de l'époque: pleine vitesse (24-25 nds) à pleine charge. La mise en place du Slow Steaming change ces conditions optimales. Les nouveaux bulbes d'étrave sont optimisés pour une plage de vitesse et de tirant d'eau plus faibles et plus uniquement en un seul point. L'ensemble du profil opérationnel du navire est pris en compte.

Plusieurs études numériques ont été réalisées pour déterminer le bulbe optimal. Ensuite, grâce aux calculs numériques (CFD), une comparaison entre le bulbe d'origine et le nouveau a été faite afin d'évaluer théoriquement le gain généré suite à un changement de bulbe.

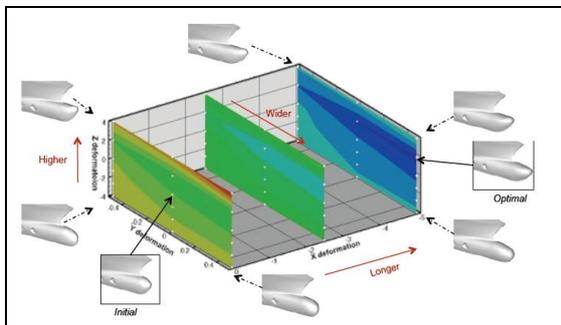


Figure 13: Détermination du nouveau bulbe optimal (HydrOcean).

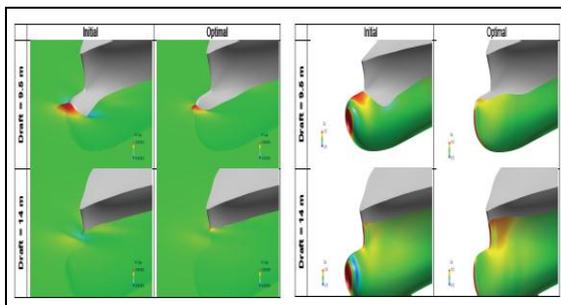


Figure 14: Evaluation numérique de la résistance à l'avancement (HydrOcean).

Depuis 2013, il y a eu des changements de bulbe pour 38 navires de la flotte. Les gains de consommation obtenus sont proches des gains calculés. Ces gains varient en fonction du navire, de la vitesse et du tirant d'eau de l'ordre de 5--12%. Les émissions des gaz polluants sont ainsi réduites dans les mêmes proportions.



Figure 15 : Changement de bulbe de CMA CGM TOSCA (Avril 2013).

4.1.4. Pales sur écrou d'hélice - Propeller Boss Cap Fins (PBCF)

On remarque que l'écoulement en amont du système de propulsion est perturbé par un vortex induit par le noyau de l'hélice d'où la nécessité d'un dispositif permettant d'éliminer / réduire l'amplitude de ce vortex.

Plusieurs entreprises ont fait les études du projet pour finir par la construction du PBCF. Simple et bien rentable, le PBCF devient indispensable pour les porte-conteneurs. Sous forme d'une petite hélice, les pales du PBCF sont orientées de façon à réduire le vortex entraînant un meilleur écoulement sur le safran. Grâce à ce dispositif, les gains de combustible peuvent atteindre dans certaines conditions 3-5%⁶.

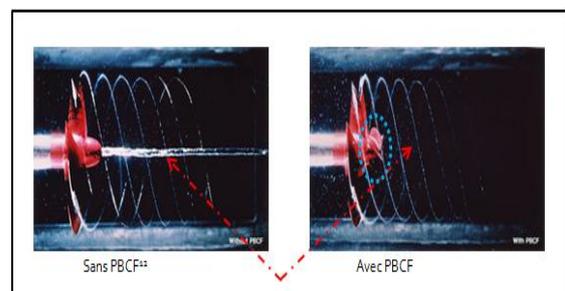


Figure 16 : Réduction du vortex après l'installation du PBCF.

⁶ Le pourcentage exact de gain est encore en cours de test.

4.1.5. Nettoyage des œuvres vives

Les œuvres vives des navires ont tendance à se recouvrir de bio-salissures (bio-fouling) ou à se corroder, malgré l'application de systèmes de peintures spécialement conçues pour lutter contre ces phénomènes. Cela se traduit par une augmentation de la rugosité de surface moyenne immergée qui engendre une augmentation de la trainée du navire et donc une surconsommation de combustible.

Le plan de maintenance du navire inclut donc des étapes de nettoyage de coque et de l'hélice qui interviennent à différents moments de la vie du navire :

- Une première plongée d'inspection 3 ans après neuvage.
- Propeller polishing & Hull cleaning : il s'agit d'un nettoyage à flot de la coque et suivi d'un polissage de l'hélice. La politique de CMA Ships exige un polissage de l'hélice chaque année et un nettoyage à haute pression de la coque chaque trois ans.
- Le Dry Dock (carénage): c'est l'ensemble des opérations de maintenance de la coque d'un navire comportant un nettoyage des salissures et une protection contre la corrosion



Figure 17 : Quelques étapes du Dry Dock (CMA CGM OTELLO - Mai 2013).

Pour les porte-conteneurs de CMA CGM, la société de classification impose d'inspecter le navire en dry-dock tous les 5 ans pour certains navires et tous les 7,5 ans pour d'autres. Lors de ces dry-dock, en parallèle des opérations de maintenance sur les moteurs, les œuvres vives sont généralement nettoyées et des retouches de peintures sont effectuées.

La réduction de consommation directe après chacune de ces opérations est difficile à évaluer mais elles représentent des économies en combustible qui s'élèvent à plusieurs dizaines de millions d'euros par ans.

4.2. Suivi des performances réelles des porte-conteneurs

Certes, les utilisations du modèle développé sont nombreuses et diversifiées. D'une part, l'outil facilite énormément, pour le département E&I, la surveillance de l'état des navires en suivant la consommation avant et après les modifications effectuées. En challengeant chaque navire à son historique, on peut agir d'une manière plus vite en cas de surconsommation importante en contactant le superintendant responsable du navire en question.

D'autre part, l'outil permet à CMAShips de valider les calculs numériques effectués lors d'une modification (Exemple : changement de bulbe, installation d'un PBCF etc.). Pour le cas des changements de bulbe, seulement trois navires ont changé le bulbe en 2013, et après observation de la diminution considérable de la consommation pour ces navires et validation des calculs, 28 navires ont changé leurs bulbes en 2014. Donc, se servir de l'outil pour construire deux modèles : modèle avant changement de bulbes et modèle après en modifiant les données de navigation selon la date du changement de bulbe présente une méthode astucieuse pour déterminer l'écart réel entre les deux modèles et par conséquent valider les calculs numériques. Le modèle permet aussi de comparer les données actuelles à un modèle passé et mesurer l'évolution de l'écart ce qui permet d'être encore plus réactif. Ainsi, on anticipe les améliorations pour les autres navires de la flotte en vue de réduire la quantité de combustible consommée pour chaque navire.

Vu les différentes améliorations qu'un porte-conteneurs peut subir, pour chaque classe de navires, des modèles avant et après modification ont été construits. Pour ce faire, seuls les évènements majeurs dans le cycle de vie d'un navire sont à considérer à savoir le changement de bulbe (modification de la structure hydrodynamique) et le TC cut out (modification du moteur principal). Donc en fonction des dates de ces modifications, les données sont divisées en deux fichiers pour avoir, après régression, les deux modèles et pouvoir ainsi faire la comparaison. Pour les navires qui n'ont pas au moins une de ces deux modifications principales, le modèle est construit à partir de la date du dernier Dry Dock ou simplement des données des deux dernières années.

Une fois le travail de construction des modèles est effectué, il faut interpréter les résultats pour chaque classe de navires. Théoriquement, à chaque modification correspond un pourcentage de réduction de consommation. Pour une classe de navires, ce gain varie en

fonction, d'une part, des paramètres dont dépend la consommation et d'autre part du navire.

En cas d'anomalies (surconsommation très importante, absence de gain ou encore sous-consommation), l'interprétation des résultats s'est basée sur l'historique des modifications des porte-conteneurs (spécifications de chaque modification), sa ligne de service, nature du combustible utilisé, pertinence des données de navigation pour quelques classes de navires.

Exemple : CMA CGM OTELLO (8500 EVP)
Un changement de bulbe a eu lieu pour ce navire en Mai 2013, ainsi qu'une installation du système de TC Cut Out (Juillet 2012). La courbe rouge représente le nouveau modèle après ces modifications et la courbe noire représente le modèle avant modifications. L'écart très important (environ 10%) est du majoritairement à la modification combinée (Bulbe + Tc Cut Out).

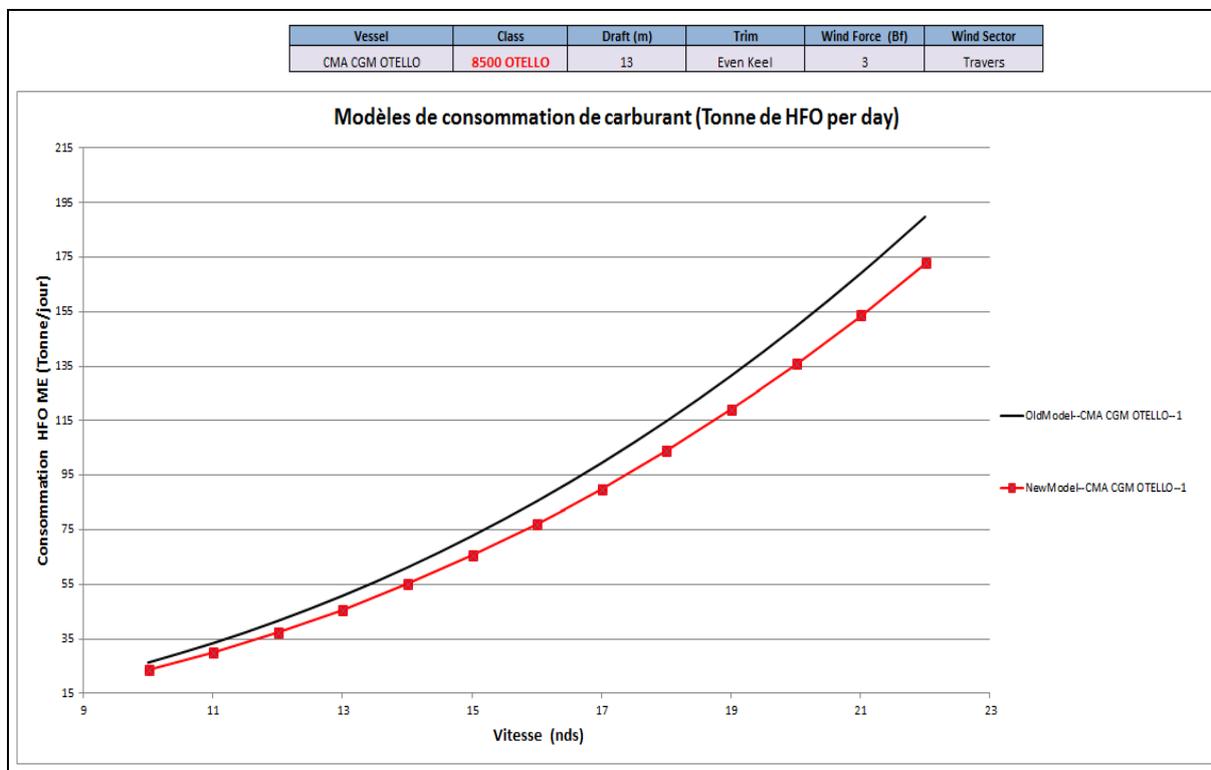


Figure 18: Courbes de consommation avant et après changement de bulbe (CMA CGM OTELLO)

5. CONCLUSION

Un modèle de consommation de combustible en fonction des paramètres de voyage a été construit pour chaque navire. La modélisation est très satisfaisante pour les classes de navires de grande capacité. Ce modèle nécessite d'être mis à jour à chaque étape de maintenance majeure susceptible d'engendrer une variation de la consommation. Il est cependant peu fiable pour les navires à faible capacité dont les données de navigation récoltées sont moins nombreuses et moins précises. Donc le travail à venir sera d'améliorer la qualité de ces données et surtout les relevés de la quantité de combustible consommée qui doivent être le plus précis possible.

Les possibilités d'augmenter la fréquence des rapports et d'installer les systèmes spécifiques sur chaque navire capables de mesurer l'amplitude de la houle (Hauteur significative des vagues et période de pic) doivent être envisageables dans un futur proche afin d'avoir une meilleure prise en compte de ce facteur.

La confrontation du modèle avec les études numériques de simulation surtout dans le cas d'une grande modification de la machine ou de la coque d'un navire est sûrement bien bénéfique pour l'outil (évolution du modèle et amélioration des facteurs des variables discrètes).

Dans tous les cas, l'importance de l'outil réside dans sa simplicité, sa facilité d'utilisation et sa portabilité. Tout en respectant la rigueur mathématique, les résultats sont proches de la réalité avec une petite marge d'erreur (<5%).

Finalement, l'intégration du modèle dans les tableaux de bord de CMA Ships a été déjà effectuée l'année dernière afin de répondre aux besoins des différents départements (Chartering, Bunkering, Fleet Center (algorithme de routage), les lignes...). De plus, l'idée d'automatiser la mise à jour des coefficients du modèle en fonction des dates de modifications effectuées rend son intégration dans le prochain projet SAP du groupe envisageable.

6. REFERENCES

- [1] MA N Diesel & Turbo – Basic Principles of Ship Propulsion– Rapport technique – 2011
- [2] HydOcean – Hydrodynamic CFD calculation and database generation: resistance – Rapport technique – Projet n° 13052 – 2013
- [3] M. Renaud, L. Berry – Ship design and optimization with Computational Fluid Dynamics – Ship efficiency seminar – Hamburg – 2013
- [4] L. Gerard – Retour expérience 'Slow Steaming' CMA CGM – Conférence ENSM – Marseille – 2012
- [5] S. Petursson – Predicting optimal trim configuration of marine vessels with respect to fuel usage – Thèse de Master – University of Iceland – 2009
- [6] H. Baudu – Porte-conteneurs géants, 1ère partie– Conférence ENSM – Marseille – 2013
- [7] J. Wigforss – Benchmarks and measures for better fuel efficiency – Thèse de Master – Chalmers University of technology – 2012