

**L'optimisation des transits des navires marchands par l'utilisation
des courants de marée.**

Alain Richard

Adresse de correspondance: Capt. Alain Richard, Innovation Maritime, 53 Saint-Germain Ouest, Rimouski, Québec, G5L 4B4 Canada; arichard@imar.ca.

Résumé

Avec la problématique du développement durable qui jusqu'à tout récemment était inexistante, il devient urgent de revoir les pratiques et façons de faire en transport fluvial. Une de ces pratiques, qui au fil des ans a été mise de côté, consiste à ajuster la vitesse des navires afin de profiter des courants de marée.

Dans ce contexte et en tenant compte de tous les facteurs impliqués, nous avons fait l'exercice de revoir cette pratique. Tout d'abord une collecte de données sur les temps de transit de voyages effectués dans le secteur des Escoumins à Trois-Rivières fût complétée. Par la suite, l'effet des courants de marée sur la progression des navires a été modélisé pour vérifier la rentabilité de l'utilisation des ondes de marées par des navires marchands. Les résultats positifs de cette analyse ont permis le développement d'un logiciel d'aide à la décision permettant, en fonction de tous les intrants, d'optimiser le transit des navires sur le Saint-Laurent et de réduire les émissions atmosphériques de ces derniers.

1.0 Introduction

Avant l'arrivée des navires à propulsion mécanique, le courant de marée était un élément prédominant dans la planification des voyages. L'industrialisation et l'évolution des modes de transport ont permis de développer des pratiques et des techniques de navigation qui visent à maîtriser les éléments plutôt que de les utiliser. C'est ainsi que les navires marchands en sont venus à effectuer leurs transits sans tenir compte des courants de marée. Avec l'arrivée de nouveaux enjeux écologiques, nous sommes à revoir les façons de faire et entre autres, l'utilisation des courants de marée par les navires marchands.

Mentionnons que pour tirer parti des courants de marée, il s'agit de ralentir le navire ou de retarder son départ afin d'être en phase avec l'onde de marée et ainsi profiter des courants qu'elle génère. En somme, il s'agit de faire un gain en carburant en échange d'une perte de temps.

2.0 Déroulement de l'étude

Comme aucune étude sur ce sujet n'a été effectuée par le passé, les prémisses servant à l'analyse découlent d'une approche intuitive. Tout d'abord, le tronçon du Saint-Laurent allant des Escoumins à Trois-Rivières a été sélectionné. Ensuite, tous les navires marchands transitant par ce secteur, sans y effectuer d'escale, peuvent faire partie de l'échantillonnage.

Pour débiter, l'effet de la marée sur les temps de transit d'un navire a été mesuré. Puis, afin de déterminer la pertinence de poursuivre l'étude, une première analyse de rentabilité fut complétée. Comme les résultats de cette première analyse se sont avérés positifs, ceci a permis d'enclencher la deuxième phase de l'étude qui portait sur la modélisation de l'effet de marée sur les navires marchands. Une fois cette modélisation complétée, une seconde analyse de rentabilité plus exhaustive est venue confirmer les résultats précédents.

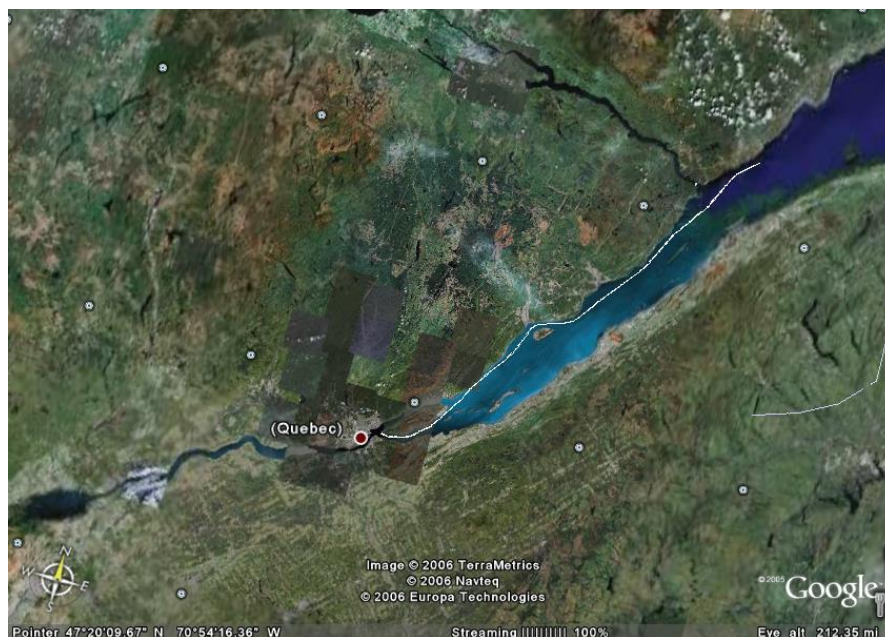
Enfin, une validation des résultats fut complétée. Cet exercice a permis de mener des essais en temps réel et de raffiner le modèle de base. La validation corroborant les résultats de l'étude, ceci nous a amenés à développer un logiciel qui permet aux navires marchands de profiter de l'effet des courants de marée entre les Escoumins et Trois-Rivières.

3.0 Méthodologie

3.1 Collecte de données

Le secteur allant des Escoumins à Trois Rivières a été retenu pour plusieurs raisons. La première relève du fait que c'est un secteur où les courants de marée se font sentir de façon importante dans l'estuaire.

Figure 1
Carte Escoumins – Trois-Rivières



En amont de Trois-Rivières, les courants de marée se perdent dans le lac Saint-Pierre. Les Escoumins est un point par lequel tous les navires marchands passent, car ils doivent obligatoirement prendre un pilote pour effectuer la remontée du Saint-Laurent ou encore, laisser le pilote s'ils descendent le fleuve. Cet endroit est donc un point stratégique dans le transit d'un navire.

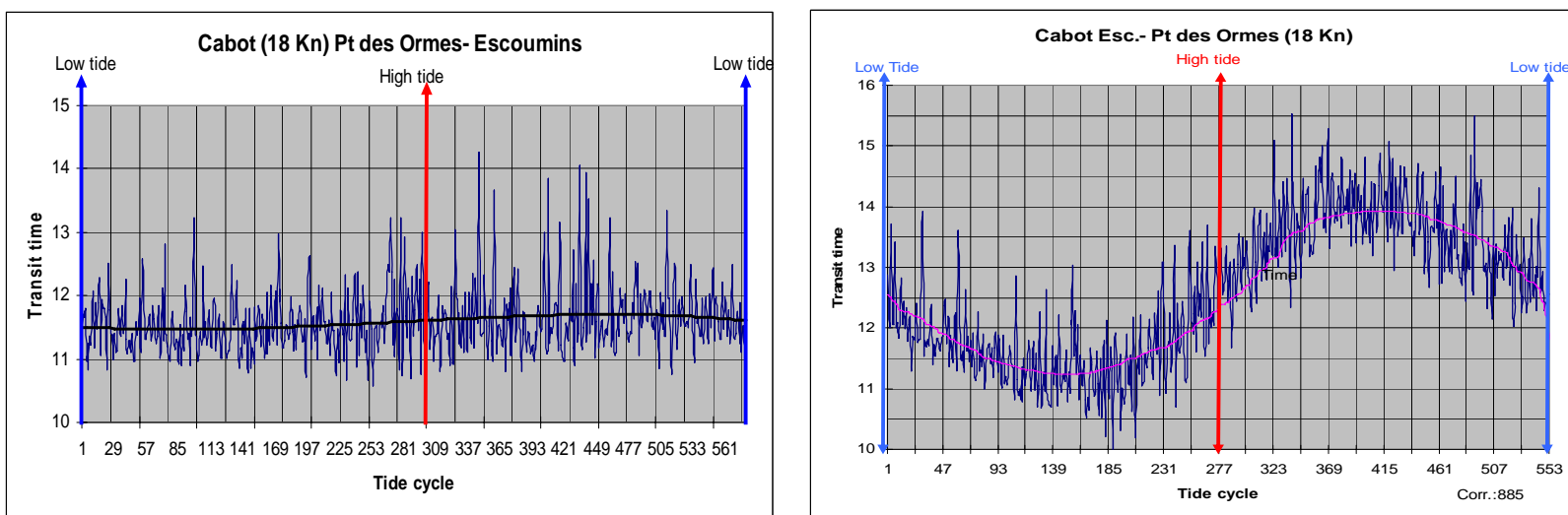
Les temps de passage aux Escoumins et à Trois-Rivières ont été compilés à partir de la base de données du Service de Communication et Trafic Maritime (SCTM) de la Garde Côtière Canadienne pour une période de douze années, et ce, pour plusieurs navires. Sur l'échantillonnage, deux navires témoins ont été sélectionnés. Pour chacun de ces navires, un échantillon contenant plus de 500 différents voyages a été retenu.

Pour la phase de validation du projet, une seconde collecte de données a été réalisée. Cette collecte s'est effectuée dans le même secteur et comprenait 25 différents navires. Les données provenaient de la base de données SCTM et il s'agissait de données en temps réel.

3.2 Modélisation de l'onde de marée

Pour les deux navires témoins, les voyages furent classés en fonction du cycle de marée, en abscisse et du temps de transit, en ordonnée. La vitesse de ces navires était de 17 nœuds. À la lumière de ces premiers résultats, il fut possible de constater l'impact de la direction de l'onde de marée sur les temps de transit. Comme l'onde de marée se déplace d'est en ouest, les navires se déplaçant dans la même direction, c'est-à-dire en remontant le fleuve, profitent d'un courant constant tout au long du transit. Par contre, les navires descendants, allant en direction opposée à l'onde de marée, profitent de courants tantôt montants tantôt descendants, dont la résultante annule les effets escomptés.

Figure 2
Effet de marée

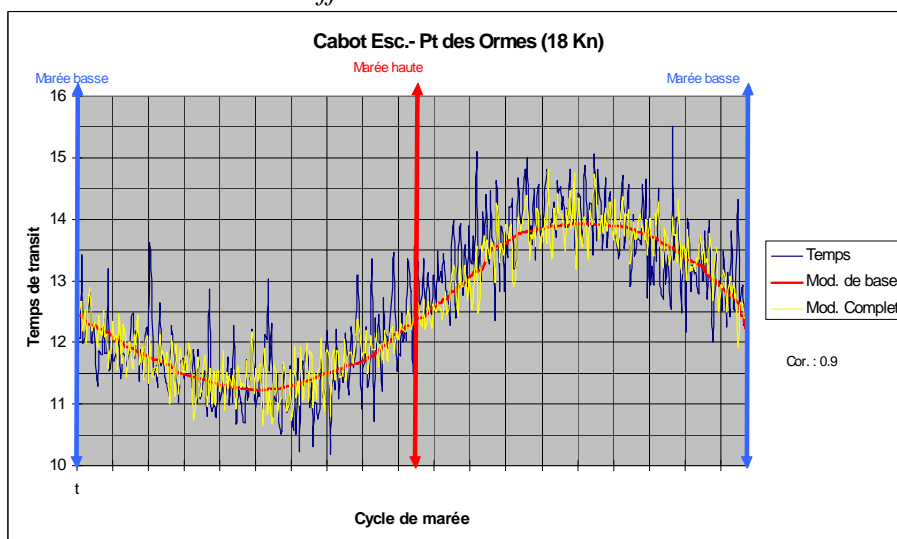


Les figures ci haut présentent en abscisse un cycle complet de marée avec une marée basse suivie d’une marée haute et d’une seconde marée basse. Ce cycle a une durée d’environ 12 heures. En ordonnée, on retrouve les temps de transit entre Trois-Rivières et les Escoumins dans le premier graphique et des Escoumins et Trois-Rivières dans le second.

La figure de gauche présente l’effet du courant de marée sur un navire descendant. La résultante des courants est nulle et le temps de transit demeure constant, à environ 11.5 heures. Par contre, sur la figure de droite, il est possible d’observer que le temps de transit varie de 11.25 à près de 14 heures de façon sinusoïdale, en fonction du cycle de marée.

À partir des informations provenant de la base de données, il a été possible de modéliser l’effet de marée sur les navires montants en fonction du cycle de marée et de l’amplitude de la marée. Des éléments exogènes tels que la force du vent, les glaces, etc. ont été pris en considération dans l’analyse, mais, ils ne font pas partie de la modélisation, car leurs impacts dépendent de conditions particulières pour chaque navire. En tenir compte impliquerait donc une modélisation différente pour chacun des navires.

Figure 3
Effet de marée montante



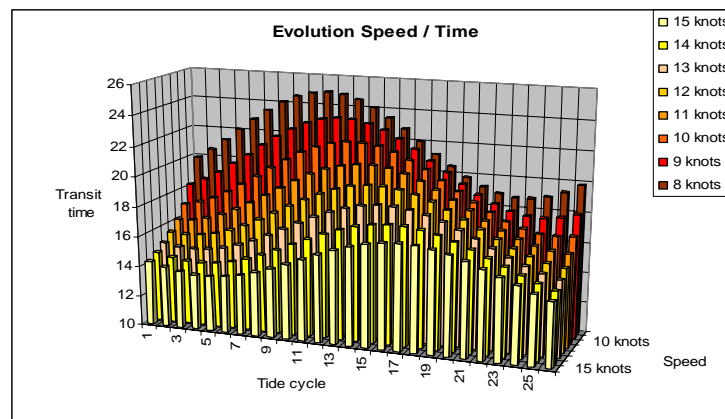
La figure ci haut présente en abscisse un cycle complet de marée avec une marée basse suivie d'une marée haute et d'une seconde marée basse. Ce cycle a une durée d'environ 12 heures. En ordonnée, on retrouve les temps de transit entre le point d'embarquement du pilote aux Escoumins et le point d'embarquement du pilote de Trois-Rivières (Pointe des Ormes).

La figure ci-dessus permet de voir la performance du modèle par rapport aux temps de transit réalisés. La modélisation arrive à un facteur de corrélation de 0.9 avec les temps de transit historiques.

Le même exercice a été complété avec d'autres navires opérant à différentes vitesses. L'analyse des données recueillies a permis de modéliser l'effet de courant de marée sur les navires, en tenant compte de la vitesse du navire, de la phase de l'onde de marée et de l'amplitude de l'onde de marée. Le résultat du modèle consiste en une fonction sinusoïdale d'amplitude variante et décalée sur le cycle de marée en fonction de la vitesse du navire.

Figure 4

Effet de la marée en fonction de la vitesse



La figure précédente représente le résultat de la modélisation de l'onde de marée pour des navires évoluant à des vitesses différentes. La composante vitesse a pour effet d'amplifier l'effet de courant et de générer un décalage.

4.0 Analyse de rentabilité

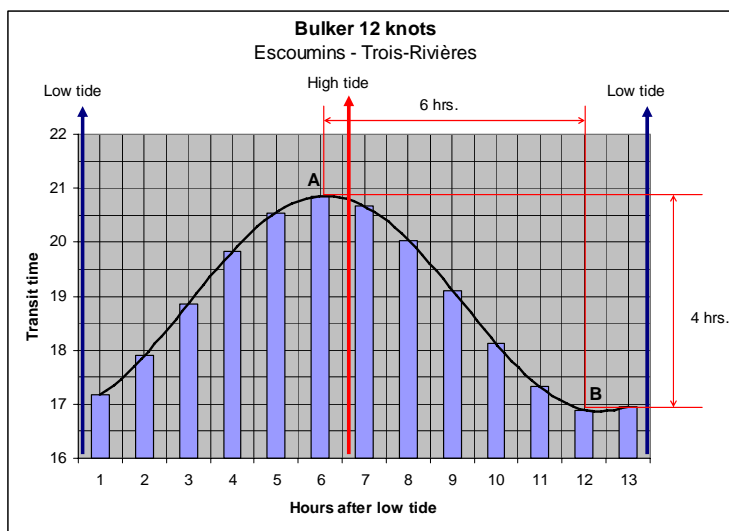
Force est de constater que pour les navires témoins, le temps de transit minimal est d'environ 11.25 heures et le temps de transit maximal de 14 heures. Cette différence de 2.75 heures est fonction du moment où le navire passe aux Escoumins par rapport à l'onde de marée. Cependant, pour profiter du courant de marée, il est souvent nécessaire de ralentir la vitesse du navire de façon à arriver aux Escoumins au bon moment par rapport à l'onde de marée. Ce qu'il faut prendre en considération est que le fait de ralentir le navire pour arriver aux Escoumins au bon point de marée va engendrer un retard sur le temps d'arrivée normal. Il est évident que le navire qui ralentit n'arrivera pas à rattraper le temps perdu s'il ne peut pas dépasser la vitesse initiale. Mentionnons ici qu'une partie de ce retard sera rattrapé par l'effet de marée, mais il y a une perte de temps nette qui demeure.

Ajuster la vitesse du navire pour arriver au bon point de marée occasionne une perte de temps nette, donc, une perte de rentabilité. En échange de cette perte de temps partiellement compensée par l'effet de marée, on observe un premier gain en carburant en raison du ralentissement du navire pour arriver au bon point de marée et un second par le fait que le transit entre les Escoumins et Trois-Rivières prend moins de temps de navigation grâce aux courants de marée. L'analyse a donc porté sur le gain provenant de la comparaison de la perte économique générée par la perte de temps versus l'avantage économique provoqué par le gain en carburant. Dans cette première analyse, les facteurs exogènes, tels que la sécurité, la réduction des émissions des gaz à effet de serre, la diminution des frais de pilotage, n'ont pas été pris en considération.

Afin de bien estimer les gains en carburant potentiels, les courbes de consommation des navires ont été analysées en prévision d'une modélisation, mais il s'est avéré qu'un modèle empirique déjà existant et couramment employé donnait des résultats adéquats. Par l'application des modèles développés, cette première analyse a permis de démontrer de façon indéniable qu'il existe un avantage économique non négligeable à utiliser les courants de marée. Dans 50 % des transits montants, un navire sera confronté à une résultante de courant de marée négative. Dans tous ces cas, sauf circonstances particulières, il est rentable d'ajuster la vitesse du navire pour profiter des courants de marée. Bien entendu dans les autres cas, lorsque le courant résultant est positif, il n'est pas rentable de ralentir le navire, sauf, encore une fois, en cas de circonstances particulières.

L'exemple suivant, basé sur les données réelles d'un navire-vraquier canadien (affrètement 24 000 \$US/jour, consommation 24 tonnes/jour, prix du carburant 271 \$US/t), illustre le cas où le navire arriverait au pire moment de marée aux Escoumins et auquel on appliquerait un ralentissement maximal de 6 heures de façon à réduire le transit Escoumins – Trois-Rivières au minimum.

Figure 5
Exemple de vraquier



L'illustration précédente permet de constater qu'un navire qui arriverait au point A aux Escoumins aurait un temps de transit de 20.75 heures. Si on retarde le navire de 6 heures de

façon à ce qu'il passe aux Escoumins au point B, son nouveau temps de transit sera de 16.75 heures, donc un gain de 4 heures. La perte nette en temps pour profiter des courants de marée est de 2 heures.

Si l'on fait l'analyse des gains et des pertes de l'exercice, il faut tout d'abord convertir la perte en temps en valeur monétaire, puis convertir le gain en tonnes de mazout, en valeur monétaire. Le tableau suivant permet de dégager les gains nets obtenus lors de l'exercice précédent.

Tableau 1
Les gains nets

Régulier	Ralentissement	Marée	Total	Total (\$ us)
Temps (h)	-6 heures	4 heures	-2 h	-2 000 \$
Carburant (t)	8,64 tonnes	4 tonnes	12,64 t	3 425 \$
Gain				1 425 \$

Pour un navire normal, dans le cas où l'on passe des pires conditions de courant aux meilleures en ralentissant le navire, il est raisonnable de croire que les économies nettes générées par l'exercice seraient de 1425 \$.

5.0 Application optimale

La modélisation du courant de marée a permis de constater des gains potentiellement intéressants par l'ajustement de la vitesse d'un navire afin de profiter des courants de marée. Mentionnons que chaque navire a une courbe de consommation différente, des revenus d'affrètement différents, des vitesses d'opération différentes, des prix différents pour le carburant et ainsi de suite. Tous ces facteurs font que dans certains cas, il peut s'avérer profitable de ralentir un navire afin de profiter des courants de marée et que dans d'autres cas cette pratique peut causer des pertes nettes.

Toutefois, la courbe du temps de transit par rapport au cycle de marée est constante pour une même vitesse de navire. Ce qui détermine s'il y a rentabilité ou non, c'est la pente de cette courbe. Il y a un point sur la courbe qui correspond au moment dans le cycle de marée où : le coût du transit direct (sans appliquer le modèle) est égal au coût du transit en appliquant le modèle. C'est à partir de ce point que l'application du modèle devient rentable ou non. Dans le cas où un navire effectue un arrêt complet aux Escoumins, en attendant le bon point de marée il est possible de poser l'équation suivante :

La rentabilité de l'application du modèle débute ou se termine au moment où :

Coût de transit direct = Coût du transit modifié

Temps de transit + Consommation =

Attente + Temps de transit modifié + Consommation

À partir des intrants suivants, il est possible de transformer notre hypothèse en équation :

T _i	Temps du transit sans appliquer le modèle
T _o	Temps de transit en appliquant le modèle
C _i	Consommation à vitesse normale
P	Prix du carburant
R	Revenu d'opération du navire
I	Temps d'attente pour la marée

$$(T_i * R) + (T_i * C_i * P) = (I * R) + (T_o * R) + (T_o * C_i * P) \quad (1)$$

De l'équation ci haut, il est possible d'en arriver à déterminer la pente qui correspond à l'optimum représenté sur un graphique semblable à celui de la figure 5. La pente correspondant à :

$$Pente = \left(\frac{T_i - T_o}{I} \right) = \left(\frac{R}{R + C_i P} \right) \quad (2)$$

Dans le cas de notre exemple, il s'agit d'un navire qui ajuste sa vitesse 24 heures avant son arrivée prévue aux Escoumins. L'équation permettant de trouver l'optimum est donc différente de la précédente :

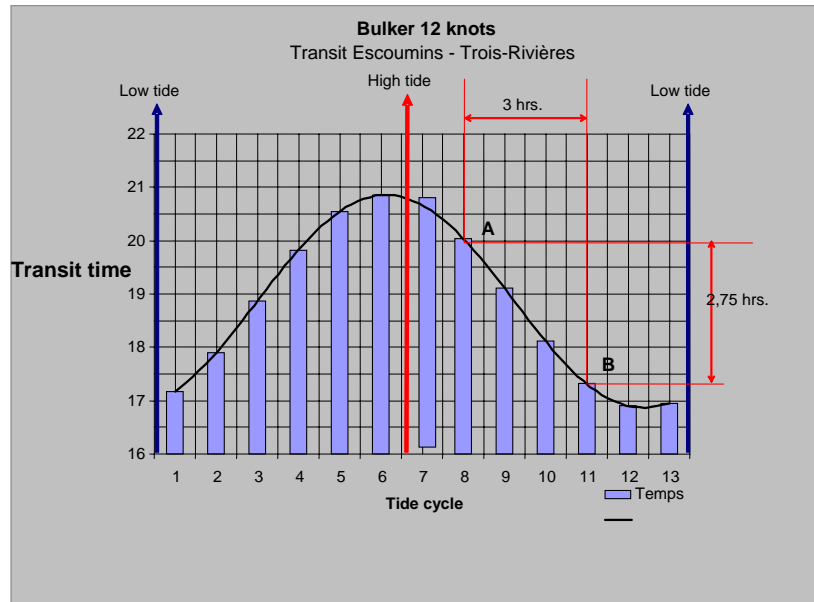
$$(T_i * R) + (T_i * C_i * P) = (I * R) + (T_o * R) + (T_o * C_i * P) - (D * C_i * P) + (D * C_r * P) + (I * C_a * P) \quad (3)$$

Cette équation nous permet d'obtenir, sur la courbe du temps de transit par rapport au cycle de marée, le point où la pente correspond à la fin ou au début de la rentabilité de l'application du modèle et ainsi, faire une utilisation optimale du modèle.

Si l'on applique le principe d'optimisation, il est possible pour le même navire que dans l'exemple précédent et dans les conditions optimales, d'obtenir des résultats beaucoup plus intéressants.

L'illustration précédente permet de constater qu'un navire qui arriverait aux Escoumins au point A, où la pente de la courbe est optimale (début de rentabilité) aux Escoumins, aurait un temps de transit de 20 heures. Si on retarde le navire de 3 heures, de façon à ce qu'il passe aux Escoumins au point B, où la pente est optimale (fin de la rentabilité), son nouveau temps de transit sera de 17.25 heures, donc un gain de 2.75 heures. La perte nette en temps pour profiter des courants de marée est de 0.25 heure.

Figure 6
Dans les conditions optimales



Le tableau suivant présente les résultats obtenus dans des conditions optimales d'application de réduction de vitesse pour profiter des courants de marée.

Tableau 2
Les résultats dans les conditions optimales

Optimal	Ralentissement	Marée	Total	Total
Temps (h)	-3	2,75	-0,25	-250 \$
Carburant (t)	5,54	2,75	8,29	2 247 \$
Gain				1 997 \$

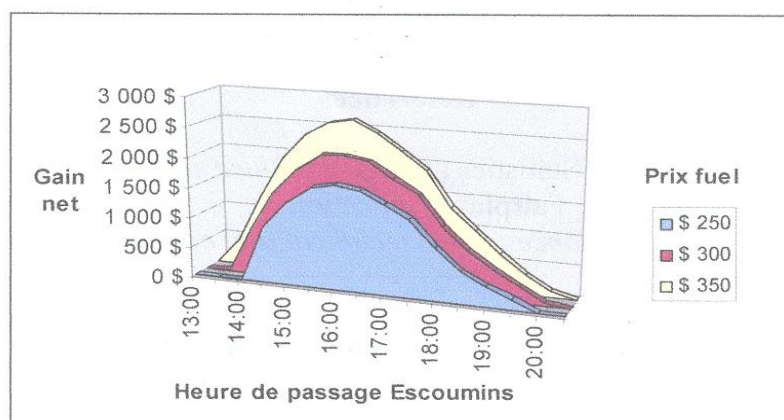
6.0 Résultats

Dans l'analyse de rentabilité et d'optimisation qui vous est présentée, ce sont uniquement les gains économiques qui ont été pris en compte, sans quantifier monétairement les réductions d'émission de gaz à effet de serre, les avantages opérationnels, la réduction des frais de pilotage et autres facteurs rattachés à l'utilisation optimale des courants de marée.

Il a été possible de démontrer que pour un navire semblable aux navires témoins, le système s'avère rentable sur 50 % des transits effectués. Avec un prix de 233\$ US la tonne de mazout, le gain moyen (pour tous les transits) que permet l'application du modèle est de 566 \$ US, avec une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 14.6 tonnes par voyage. Ce qui représente pour l'opération annuelle d'un navire effectuant un voyage hebdomadaire un profit net de 29 432 \$US et une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 759 tonnes.

Il est important de souligner que le prix des intrants, comme le coût du carburant, les taux d'affrètement, etc., a un impact direct sur les revenus que peut générer le modèle. Le graphique suivant présente l'impact d'une fluctuation de prix du carburant sur le gain monétaire que permet de générer le modèle.

Figure 7
Variation du prix du carburant



Avec le graphique ci-haut, il est possible constater qu'une variation du prix du carburant de 15 % génère une augmentation du rendement monétaire du modèle de 24 %.

7.0 Validation

Une validation du modèle de calcul a été réalisée. Cette validation a porté sur 193 voyages répartis entre 35 navires. Pour chacun des navires, une vitesse sur l'eau a été allouée à partir d'une première analyse. Par la suite, pour chacun des voyages effectués, le modèle a été employé pour calculer le temps d'arrivée prévu. Le temps obtenu par le modèle a été comparé avec le temps réellement observé.

Sur les 193 voyages, 27 ont été retranchés, car ils concernaient le navire CTMA Vacancier, qui ajustait sa vitesse pour se présenter à heures fixes à Québec. Avec les 166 voyages restants, nous avons obtenu un facteur de corrélation de 0.92 entre le temps réel employé pour le transit et les temps calculés par le modèle.

Enfin, des 166 voyages employés, nous avons retiré 59 voyages au cours desquels les navires de fort tonnage réduisent leur vitesse pour des raisons d'enfoncement dynamique et ainsi, avec les 107 voyages restants, le facteur de corrélation a été de 0.96.

Il est donc juste d'affirmer qu'en condition normale d'opération, le modèle de prévision répond avec un facteur de corrélation de 0.96.

8.0 Conclusion

Initialement, le développement de ce modèle était basé sur une approche intuitive visant à permettre de faciliter le travail des navigateurs en eaux restreintes. Il a été intéressant de démontrer que l'intuition s'est avérée profitable, tant sur le plan de la navigation que sur le plan de la rentabilité des opérations. L'analyse des résultats a aussi permis d'évaluer des avantages qui n'étaient pas pris en compte au départ entre autres, les émissions de gaz à effet de serre, les temps de transit connus de façon plus précise, etc.

Bien entendu, l'application du modèle n'est pas profitable dans tous les cas et lorsque le gain n'est pas significatif, l'utilisateur n'a qu'à procéder sans le modèle. Somme toute, il est possible d'affirmer que l'utilisation du modèle ne peut qu'être rentable et que cette rentabilité ne se fait pas au détriment d'autres objectifs reliés au transit. Il s'agit d'une situation où tous les intervenants sont gagnants.

Références

- Fairplay International Records and Statistics (1980): *Standard ship designs v.2: dry cargo vessels 499 grt - 9,500 dwt*. London: Fairplay Publication.
- Hughes, C. N (1987): *Ship Performanc: some technical and commercial aspects*, New York: Lloyd's of London Press
- Stroke, E.A.(1991): *Naval architecture for marine engineers* 4th ed. London: T. Reed.
- Harvald, Svend Aage (1992): *Resistance and Propulsion of Ships*, Florida: Krieger Publishing.
- Maddala, G.S. (2001): *Introduction to Econometrics*, 3rd ed. New York: J. Wiley & Sons, Inc.
- Wonnacott, Thomas H. and Ronald J. (1990): *Introductory Statistics for Business and Economics* 4th ed. New York: J. Wiley & Sons, Inc.
- Larsen, Richard J. and Morris L. Marx (2001): *An Introduction to Mathematical Statistics and its Applications*, #rd ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Service Hydrographique Canadien Table des marées
<http://www.waterlevels.gc.ca/french/Canada.shtml>
- Service Hydrographique Canadien (1997): *Atlas des courants de marées-Estuaire de Saint-Laurent*.