



**HAL**  
open science

# Optimisation bi-critère de la vitesse le long d'un trajet maritime

Estelle Chauveau, Philippe Jégou, Nicolas Prcovic

► **To cite this version:**

Estelle Chauveau, Philippe Jégou, Nicolas Prcovic. Optimisation bi-critère de la vitesse le long d'un trajet maritime. Treizièmes Francophones de Programmation par Contraintes, JFPC 2017, Jun 2017, Montreuil-sur-Mer, France. hal-01785208

**HAL Id: hal-01785208**

**<https://amu.hal.science/hal-01785208>**

Submitted on 7 May 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Optimisation bi-critère de la vitesse le long d'un trajet maritime

Estelle Chauveau<sup>1,2 \*</sup>Philippe Jégou<sup>2</sup>Nicolas Prcovic<sup>2</sup><sup>1</sup> Atos

73 Rue de Saint-Mandrier-sur-Mer, 83140 Six-Fours-les-Plages (France)

<sup>2</sup> Aix-Marseille Univ, Université de Toulon, CNRS, ENSAM, LSIS, Marseille, France

Avenue Escadrille Normandie-Niemen, 13397 Marseille Cedex 20 (France)

{estelle.chauveau, philippe.jegou, nicolas.prcovic}@lsis.org

## Résumé

Avec la dépendance du prix du pétrole et ses variations ainsi que les préoccupations environnementales, les acteurs du transport maritime sont de plus en plus nombreux à chercher des outils d'aide à la décision leur permettant d'optimiser le temps de trajet en même temps que la consommation de carburant (optimisation bi-objectif). Dans le problème traité, la donnée d'entrée est un itinéraire, et nous nous intéressons à optimiser le temps de trajet et la consommation en fonction d'un unique paramètre : la vitesse le long de cet itinéraire. Nous présentons ainsi une modélisation du problème, puis nous expliquons pourquoi une approche exacte ne semble pas pertinente. Nous proposons ensuite trois méthodes de résolution qui semblent adaptées au contexte et qui devront dans un second temps être implémentés puis testés afin de juger de leur intérêt pratique.

## 1 Introduction

Dans le domaine du transport de marchandises par voies maritimes, les grandes compagnies d'affrètement cherchent à optimiser la consommation de carburant en même temps que le temps de transport des marchandises. Ces deux objectifs sont contradictoires puisque l'augmentation de la vitesse du bateau diminue le temps de transport mais augmente la consommation de carburant (cf figure 1). Les conditions météorologiques (notamment prévisionnelles) sont un élément à prendre en compte dans cette optimisation puisqu'il influe sur les deux objectifs. Ainsi, choisir la route qui sera empruntée par le bateau est un processus complexe. Pour cela les compagnies d'affrètement

maritime recherchent des systèmes d'aide à la décision proposant rapidement un éventail d'alternatives intéressantes. Une route maritime est définie par un itinéraire ainsi que la vitesse le long de cet itinéraire. Nous nous sommes intéressés dans un premier travail [3] au calcul d'itinéraires, en fixant la vitesse à une valeur arbitraire constante. Cependant, la météo variant au cours du temps dans chaque zone, il devrait être profitable d'accélérer ou de ralentir à certains moments pour traverser les différentes zones dans des conditions globalement plus favorables que si on se déplaçait à vitesse constante. Cet article traite du problème d'optimisation des deux objectifs cités (temps de trajet et consommation de carburant) en fonction de la vitesse de navigation, et non pas de l'itinéraire. Pour cela, l'itinéraire est fixé au départ, et la vitesse est le seul paramètre du problème. Au delà de cet article, l'objectif applicatif est de proposer un outil qui combine l'optimisation de l'itinéraire avec l'optimisation de la vitesse.

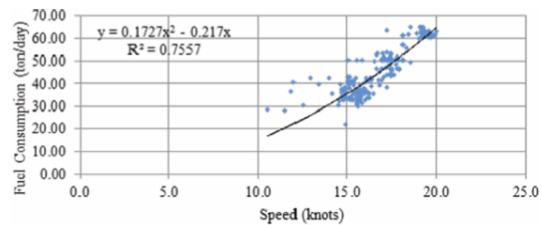


FIGURE 1 – Allure des courbes de durée et consommation en fonction de la vitesse, à météo constante ([2]).

\*Papier doctorant : Estelle Chauveau<sup>1,2</sup> est auteur principal.

## 2 Modélisation des données du problème

Il s'agit ici de représenter des itinéraires dans le temps. À cette fin, nous allons nous appuyer sur un *graphe daté*. Dans un tel graphe, chaque sommet du graphe représente une coordonnée géographique datée (de la même manière que dans [1]) et chaque arc représente une route orthodromique entre ces coordonnées géographiques datées (date de départ et date d'arrivée). Dans ce cadre, les sommets du graphe sont les points d'un espace tridimensionnel discrétisé  $E = X \times Y \times T$  où  $X$  représente la latitude avec  $X = [0; x_{max}]_{\mathbb{N}}$ ,  $Y$  représente la longitude avec  $Y = [0; y_{max}]_{\mathbb{N}}$ , et  $T$  représente le temps avec  $T = [0; t_{max}]_{\mathbb{N}}$ . Ainsi, nous pouvons définir un graphe  $(S, A)$  où  $S \subset E$  est l'ensemble des sommets et  $A$  l'ensemble des arcs. Les arcs possibles sont de la forme  $(s, s')$  tels que  $s = (x, y, t)$  et  $s' = (x', y', t')$  et ils doivent nécessairement vérifier deux conditions :

1.  $x' = x \pm 1$  ou  $y' = y \pm 1$  pour imposer que les sommets soient voisins au niveau géographique ;
2. et  $t' \in [\frac{d}{v_{min}} + t; \frac{d}{v_{max}} + t]_{\mathbb{N}}$  où  $d$  est une distance telle que  $d = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2}$  et  $v_{min}$  (resp.  $v_{max}$ ) la vitesse minimale autorisée pour le bateau (resp. vitesse maximale), pour imposer que les sommets soient voisins au niveau temporel, dans le respect des vitesses autorisés.

Au graphe  $(S, A)$ , nous allons adjoindre une fonction  $\vec{c}$  qui associe à chaque arc un vecteur de coûts de dimension 2 ( $A \rightarrow \mathbb{N}^2$ ). Ainsi, pour chaque arc  $a_{ij} = (i, j) \in A$ , on a :

$$\vec{c}(a_{ij}) = \begin{pmatrix} c_1(a_{ij}) \\ c_2(a_{ij}) \end{pmatrix}$$

où  $c_1$  est la durée de traversée de l'arc  $(i, j)$  tandis que  $c_2$  est la consommation de carburant sur cette traversée. Le graphe dans lequel seront exprimées les données est donc de la forme  $G = (S, A, \vec{c})$ .

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons à l'optimisation de la vitesse le long d'un itinéraire donné. Ainsi, on appelle *itinéraire* la définition des différents points de passage dans l'espace, et *itinéraire daté* la définition des différents points de passages associés chacun à une date de passage. Les itinéraires datés correspondront donc à des chemins dans le graphe. On peut voir en fig. 2 le tracé bleu qui représente un itinéraire (le sens des arcs n'est pas indiqué ici car il est implicite). Il correspond à une projection de chemins de  $G$  dans le plan  $(X, Y)$ . Le tracé orange représente les différentes vitesses possible le long d'un tel itinéraire et il s'agit donc d'itinéraires datés. On peut observer sur ce tracé orange que tous les arcs sont nécessairement «montants» car leur traversée

impose un temps bien sûr strictement positif. Une conséquence immédiate est que le graphe  $(S, A)$  est nécessairement sans circuit pour des questions de temporalité.

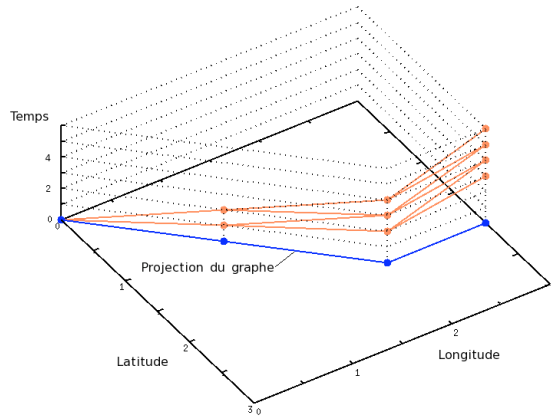


FIGURE 2 – Représentation de chemins dans l'espace.

Nous précisons maintenant quelques notations complémentaires utiles par la suite :

- en cas de conditions météorologiques *neutres* (pas de vent, pas de vagues etc.), nous noterons  $\vec{c}_1^{neutre}(a_{ij})$  (resp.  $\vec{c}_2^{neutre}(a_{ij})$ ) la valeur de la durée (resp. la consommation de carburant) sur l'arc  $a_{ij}$ .
- $d_{ij}$  désigne la longueur d'un arc  $(i, j)$
- $\delta t$  la durée réelle représentée par un intervalle de temps  $[t, t + 1]$
- $tr_i$  ou *tranche géographique* d'indice  $i$ , désigne l'ensemble des arcs du graphe (courbe orange sur la fig. 2) de sommets d'origine  $(x_i, y_i, t)$  dont la projection sur le plan  $X \times Y$  est le sommet  $(x_i, y_i)$  (courbe bleue sur la fig. 2) correspondant à l'unique  $i^{eme}$  arc de l'itinéraire.

Le cadre formel que nous venons de définir sur la base du graphe  $G = (S, A, \vec{c})$  va nous permettre de représenter les données. Celle-ci seront en fait constituées d'un unique itinéraire mais associé à un ensemble d'itinéraires datés. Cela nous permet maintenant d'exprimer le problème que nous souhaitons traiter.

## 3 Problème général

Étant donné un graphe  $G = (S, A, \vec{c})$  qui représente un unique itinéraire, allant du point géographique d'origine de coordonnées  $(x_{or}, y_{or})$  jusqu'au point géographique d'arrivée  $(x_{ar}, y_{ar})$ , il s'agit de calculer des

solutions pareto-optimales par rapport aux deux objectifs considérés, soit la durée du trajet et la consommation de carburant.

### 3.1 Estimation de la taille du graphe daté.

Nous précisons maintenant certaines caractéristiques du graphe issues de données réelles en nous appuyant sur les expérimentations conduites dans [4]. Nous avons relevé des valeurs moyennes qui montrent que dans ce cadre, les chemins pareto-optimaux possèdent en moyenne 12 arcs tandis que la longueur moyenne d'un arc est d'environ 500 km. Par ailleurs, après consultation de certaines compagnies d'affrètement maritime, il est apparu pertinent de choisir un  $\delta t$  de 45 minutes et de fixer  $v_{min} = 16$  noeuds et  $v_{max} = 20$  noeuds (cela doit être ajusté pour chaque bateau en fonction de ses caractéristiques techniques). À partir de ces informations, nous avons calculé qu'il existe 5 arcs sortants à chaque noeud (cf. contraintes vues en section 2). Sur cette base, il existe alors un total de  $5^{12}$  chemins différents.

### 3.2 Solutions pareto-optimales

À chacun de ces chemins est associé un coût global par critère (durée et carburant consommé). Or, la durée de trajet et la consommation de carburant varient de manière opposée (en fonction de la vitesse, cf. fig. 1). Ainsi, ces deux paramètres sont antagonistes. Pour cette dernière raison, dans le cas d'une météo peu variable, le nombre de solutions pareto-optimales est du même ordre de grandeur que le nombre de trajets potentiels. Si la météo est très variable, le nombre de solutions pareto-optimales diminue mais risque de rester trop élevé pour la personne qui devra ensuite choisir la solution à suivre en pratique. En plus de cela, si deux solutions sont pareto-optimales mais sont très proches, il n'est pas nécessaire de les identifier toutes les deux, une seule suffit. Aussi, plutôt que de calculer l'ensemble des chemins pareto-optimaux par une approche exacte, nous proposons dans la section 4 de restreindre le problème en nous limitant à l'identification de trajets pertinents, i.e. d'itinéraires datés qui passent par des zones dans lesquelles la météo est avantageuse.

## 4 Restriction du problème

### 4.1 Idée générale

Ce qui intéresse les compagnies maritimes peut se synthétiser par :

- la proposition d'un nombre limité de solutions (pour plus de lisibilité et pour une aide à la décision plus poussée) ;
- des chemins qui tirent partie des zones où la météo est favorable.

L'ensemble des chemins pareto-optimaux n'est pas une information pertinente, il s'agit ainsi de trouver les chemins qui passent au maximum par les arcs les plus favorables du graphe de recherche. Cette notion de favorable s'appuie sur un «score» que l'on va attribuer à chaque arc du graphe.

### 4.2 «Scorage» des arcs

Un vecteur de scores  $\vec{s}(a_{ij}) = (s_1(a_{ij}), s_2(a_{ij}))$  est attribué à chaque arc  $a_{ij}$ . Ce score correspond à un pourcentage du coût de l'arc par rapport à une météo neutre. Ainsi, pour un critère donné, un score proche de 0% correspondra à une météo quasi-neutre (pas de vent, pas de courant, etc.), un score négatif à une météo avantageuse et un score positif à une météo désavantageuse. Le score de l'arc  $a_{ij}$  en considérant le critère 1 (ce qui vaut pour le critère 2) est :

$$s_1(a_{ij}) = 100 \times \frac{c_1(a_{ij}) - c_1^{neutre}(a_{ij})}{d_{ij} \times c_1^{neutre}(a_{ij})} \quad (1)$$

avec  $v(a_{ij})$  la vitesse sur l'arc  $a_{ij}$ . Le dénominateur  $d_{ij}$  permet de normer le coût de l'arc par rapport à sa longueur. Prenons un exemple avec le critère consommation de carburant, pour un arc  $a_{ij}$  dont le coût est 150 (kilos de fuel par km). Si le coût neutre (pas de vent, pas de vagues, etc.) à la vitesse  $v(a_{ij})$  est de 140 (kilos de fuel par km), alors le score  $s_2(a_{ij})$  vaut  $100 \times (150 - 140) / 140 \approx +7\%$  (ici  $d_{ij}$  est égal à 1). Cela correspond bien à une augmentation de la consommation par rapport à une situation de mer calme. Il s'agit alors de rechercher les chemins pertinents dans le graphe  $G' = (S, A, \vec{s})$  qui ne diffère du graphe original  $G = (S, A, \vec{c})$  que par sa fonction de coût où  $\vec{s} : A \rightarrow \mathbb{Q}^2$ . Pour résoudre ce problème, nous envisageons trois méthodes qui devront être implémentées et testées :

- **Méthode par combinaison linéaire classique.** On identifie dans  $G'$  le plus court chemin mono-objectif d'une combinaison linéaire des deux objectifs. La sélection des coefficients de la combinaison linéaire peut être faite en utilisant une stratégie adaptative comme proposé dans [5]. Cette méthode permet de trouver les solutions sur l'enveloppe convexe du front de pareto.
- **Méthode basée sur le critère de Tchebycheff.** Cette méthode permet de trouver des solutions même lorsqu'elles n'appartiennent pas à l'enveloppe convexe du front de pareto. On pourra s'appuyer sur les travaux présentés dans [6].
- **Méthode par élitisme** Cette dernière méthode consiste à sélectionner parmi les arcs les mieux scorés un ensemble d'*élites*. Il s'agit ensuite de rechercher les chemins qui passent par un maximum de ces arcs élités. L'avantage de cette mé-

thode est qu'elle exploite la structure du graphe (graphe orienté sans circuit).

Cette méthode est détaillée dans la section 4.3. Les résultats de ces différentes approches devront être comparés (temps de calcul et qualité des solutions identifiées).

### 4.3 Recherche d'un chemin pertinent par élitisme

L'objectif de cette méthode est de trouver les chemins qui empruntent les zones de météo avantageuses, en se basant sur la structure du graphe (graphe orienté sans circuit). Pour atteindre cet objectif, nous procédons en deux étapes. La première étape consiste à identifier pour chaque critère les arcs élités en se basant, d'une part, sur le coût de ces arcs, et d'autre part, sur la tranche géographique dans laquelle l'arc se trouve. La seconde étape est constituée par la recherche de chemins passant par un maximum d'arcs élités.

**Étape 1 : identification des arcs «élites».** Nous introduisons ici un paramètre  $p$  qui représente la proportion d'arcs élités par tranche géographique pour chaque critère. Soit  $e$  l'arrondi à l'entier supérieur de  $p \times |tr_{courante}|$ . Pour un critère donné, les  $e$  meilleurs arcs de cette tranche seront considérés comme élités, marqués comme *favorables* et notés  $-1$ . Les autres arcs de cette tranche pour ce même critère étant marqués comme *neutres* et notés  $0$ . Cette approche permet de s'assurer de l'existence d'arcs favorables au niveau d'une tranche géographique, quand bien même les conditions météo seraient mauvaises sur celle-ci. Une fois cette notation bicritère établie, nous calculons une unique pondération par arc en calculant la somme des notes attribuées pour chaque critère ( $-1, 0$ ). Nous obtenons ainsi une valuation unique appartenant à  $\{-2, -1, 0\}$ . Il existe donc les élités classiques notées  $-1$ , et les «super» élités notés  $-2$ .

**Étape 2 : calcul des chemins de meilleurs compromis.** La recherche d'un plus court chemin dans un graphe orienté sans circuit à pondérations positives et négatives se fait en  $O(|S| + |A|)$  ([7]), et ce malgré la présence de poids négatifs. L'algorithme efficace pour ce type de graphe consiste dans un premier temps à faire un tri topologique sur le graphe en question. Cette étape est triviale dans notre cas puisqu'il suffit d'ordonner les sommets par tranches géographiques. Cela étant, si un chemin optimal est simple à obtenir, il s'agira de les lister jusqu'à ce que l'opérateur humain considère avoir obtenu une solution suffisamment satisfaisante, le passage d'une solution à une autre étant très simple à calculer.

## 5 Conclusion

Dans le cadre de l'optimisation des routes maritimes, nous travaillons sur le problème de l'optimi-

sation de la durée de trajet et de la consommation de carburant en considérant un unique paramètre : la vitesse le long d'un itinéraire donné. Ce problème a peu été étudié dans la littérature. Comme la combinatoire reste élevée et que le nombre de solutions pareto-optimales est potentiellement trop grand pour être exploitable par un décideur humain, nous nous intéressons aux méthodes qui ne fournissent pas l'intégralité des solutions pareto-optimales. Ainsi, nous évoquons trois méthodes :

- la combinaison linéaire des deux critères [5] ;
- la méthode de Lucie Galand [6] basée sur le critère de Tchebycheff ;
- la méthode par élitisme.

La finalité de ce travail est d'implémenter ces trois méthodes sur des instances réelles, et d'analyser la qualité des solutions identifiées. L'outil que nous développons devra être basé sur une ou plusieurs de ces méthodes (si les solutions qu'elles fournissent sont complémentaires). Enfin, les méthodes choisies pourront servir de sous-routine pour l'optimisation en fonction des deux paramètres vitesse et itinéraire.

## Références

- [1] Angelica Andersson. Multi-objective optimisation of ship routes. Master thesis, Goteborg, Sweden, Chalmers University of Technology, 2015.
- [2] Nicolas Bialystocki and Dimitris Konovessis. On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve : A statistical approach. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 1(2) :157 – 166, 2016.
- [3] Estelle Chauveau, Philippe Jégou, and Nicolas Pr-covic. Un algorithme multicritère pour l'optimisation des routes maritimes en temps réel. *Journée Transports Intelligents, RFIA*, 2016.
- [4] Estelle Chauveau, Philippe Jégou, and Nicolas Pr-covic. Multiobjective shortest path problem in a time dependent graph (en soumission). 2017.
- [5] Jérémie Dubois-Lacoste, Manuel López-Ibáñez, and Thomas Stützle. Adaptive “anytime” two-phase local search. In *International Conference on Learning and Intelligent Optimization*, pages 52–67. Springer, 2010.
- [6] Lucie Galand. Recherche d'un chemin de meilleur compromis dans un graphe multicritère. In *7ème Congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision (ROADEF 2006)*, pages 121–136, Lille, France, February 2006. Presses Universitaires de Valenciennes.
- [7] Ronald L. Rivest Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson and Clifford Stein. *Introduction to algorithms*. MIT Press, 2009.