Un algorithme multicritère pour l'optimisation des routes maritimes en temps réel

Estelle Chauveau[1,2] Philippe Jégou[2] Nicolas Prcovic[2]

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

[2] Aix-Marseille Université, CNRS, ENSAM, Université de Toulon, LSIS UMR 7296
Avenue Escadrille Normandie-Niemen, 13397 Marseille Cedex 20 (France)
{estelle.chauveau, philippe.jegou, nicolas.prcovic}@lsis.org

Résumé

Cet article traite du problème d'optimisation des routes maritimes en fonction des conditions météorologiques en temps réel. Ce problème relève des questions de calcul de plus court chemin multiobjectif ainsi que des problèmes de plus court chemin dans un graphe à valuations dynamiques. Nous proposons, ici, une modélisation mathématique du problème suivie de pistes de résolution.

Mots Clef

Optimisation multiobjectif, graphe à valuations dynamiques, optimisation des routes maritimes.

1 Introduction

Lors du transport de marchandises par voie maritime (80% du commerce mondial en termes de volume), la diminution de la vitesse du navire entraîne une baisse de la consommation en carburant, et l'optimisation de ces frais de carburant entre parfois en conflit avec l'objectif de minimiser la durée du trajet. Ces objectifs sont contradictoires et dépendent de paramètres météorologiques qui changent dans le temps introduisant de plus un caractère dynamique. Les armateurs sont amenés à s'appuyer sur des outils d'aide à la décision sophistiqués pour traiter la question du choix du chemin de meilleur compromis. Toutefois, les outils existants prennent rarement en compte de manière satisfaisante l'ensemble des problématiques soulevées, et au-delà, il s'agit d'un problème complexe.

À partir du problème de décision connu sous le vocable de Shortest Weight-Constrained Path, qui est NP-complet [1], on peut facilement démontrer que le problème de plus court chemin bicritère est NP-difficile (problème d'optimisation associé). Naturellement l'augmentation du nombre de critères accroît la combinatoire du problème. À cela vient se greffer une difficulté additionnelle, l'aspect dynamique de la pondération des arcs dans la mesure où celle-ci peut évoluer en fonction du temps, comme l'impose la possible évolution des conditions météorologiques pendant la durée d'un trajet. Nous présentons les propriétés du problème d'optimisation des routes maritimes, et donnons quelques pistes de résolution de ce problème.

2 Formalisation du problème

Nous proposons de modéliser le problème de déplacement sur un océan dans les termes d'un problème de plus court chemin multicritère dans un graphe à valuations dynamiques où le temps est discrétisé. Par "graphe à valuations dynamiques", nous entendons un graphe dans lequel la pondération de chaque arc est une fonction du temps. Pour cela, nous utilisons le *frozen arc model*, c'est-à-dire que le coût d'un arc est déterminé à la date où le sommet d'origine de l'arc est quitté, et reste inchangé durant sa traversée. Dans ce graphe, lorsqu'un arc existe d'un sommet i vers un sommet j, alors l'arc réciproque existe nécessairement et son coût ne sera pas nécessairement identique. Il s'agit donc d'un graphe avec circuits dans lequel les valuations ont des valeurs positives (temps, consommation de carburant, risques divers…). Formellement, il s'agit d'un graphe orienté muni d'une fonction de coût $\vec{c}$, soit un objet $G = (N, A, T, \vec{c})$. Pour définir le problème, nous distinguons deux nœuds $o, d \in N$ (respectivement l'origine et la destination) ainsi qu'une date $t_0 \in T$. N est un ensemble fini de nœuds $\{i_1, i_2, \dots i_n\}$, A un ensemble d'arcs de la forme (i, j) et T une séquence ordonnée finie de dates $< t_0, t_1, t_2, \dots >$. $\vec{c}_{ij}(t)$ est le coût de la traversée d'un arc (i, j) en quittant le sommet i à la date $t \in T$; c'est un vecteur de dimension k, ou k est le nombre de critères du problème. On notera que toutes les valuations sont dépendantes du temps. Par convention, le premier élément $[\vec{c}_{ij}(t)]_1$ du vecteur de coût est la durée de traversée de l'arc (i, j). Un chemin (nous ne considèrerons que les chemins élémentaires ici) dans G de i_0 vers i_q est une séquence de q arcs $< (i_0, i_1), (i_1, i_2), \dots, (i_{q-1}, i_q) >$ dans laquelle $i_0, i_1, \dots i_q$ sont des nœuds distincts. Soit $P_{ij}(t)$ l'ensemble des chemins de i vers j tels que le sommet i est quitté à la date t, et que le sommet j est atteint à une date $t' \in T$. Étant donné un chemin $p_{ij}(t) \in P_{ij}(t)$, avec $j \neq i$, on définit récursivement le coût total $\vec{C}$ de ce chemin. Si $p_{ij}(t)$ possède un unique arc $(i, j) \in A$, alors $\vec{C}(p_{ij}(t)) = \vec{c}_{ij}(t)$. Sinon, le chemin $p_{ij}(t)$ est composé du chemin p_{ih} suivi de l'arc (h, j), auquel cas, $\vec{C}(p_{ij}(t)) = \vec{C}(p_{ih}(t)) + \vec{c}_{hj}(t')$ avec $t' = t + [\vec{C}(p_{ih}(t))]_1$.

La solution attendue du problème est le sous-ensemble $P^*_{od}(t_0) \subseteq P_{od}(t_0)$ de chemins non dominés au sens de Pareto ([3]).

3 Propriétés du problème et algorithmes de résolution

Définition 1. *Le graphe $G = (N, A, T)$ est FIFO si $\forall (i,j) \in A$, $\forall t, t' \in T$ avec $t < t'$, on a :*

$$t + [\vec{c}_{ij}(t)]_1 \leq t' + [\vec{c}_{ij}(t')]_1$$

Rappelons que le problème de plus court chemin dans un graphe dynamique monocritère FIFO est polynomial [2]. Si dans notre modélisation la propriété FIFO est valable pour le temps (1^{er} critère dans notre modélisation), elle ne l'est en revanche pas pour les autres critères. De ce fait, il n'y a aucun moyen de savoir en avance la date idéale à laquelle on doit quitter un noeud en vue d'obtenir le chemin de coût minimum sur le trajet jusqu'au noeud destination. Cela se traduit par la propriété suivante :

Propriété 1. *[2] Dans un graphe multicritère à valuations dynamiques, un chemin pareto-optimal n'est pas nécessairement constitué de sous-chemins pareto-optimaux.*

Cette propriété constitue une différence fondamentale avec le cas du multiobjectif à valuations statiques, et de ce fait, les algorithmes multiobjectifs se basant sur cette propriété doivent subir une modification pour être adaptés au cas dynamique. Cette première propriété rend le problème particulièrement difficile à traiter.

Veneti et. al [5] propose un algorithme à étiquette permettant de résoudre ce problème malgré cette difficulté. Son algorithme consiste à partir du sommet de départ, et à itérer sur chaque date $t \in T$ en partant de t_0. À chaque itération, les noeuds atteints à la date t sont explorés. Cet algorithme, contrairement à ses prédécesseurs, ne part pas du sommet d'arrivée. Il présente donc l'avantage de ne pas balayer un nombre trop important de dates potentielles d'arrivée. Il tire en fait profit de la non possiblité d'attente au niveau d'un sommet (un bateau de commerce ne s'arrête jamais en pleine mer, notament pour des raisons mécaniques). En revanche, au sein d'une itération temporelle, l'étiquette qui est explorée est sélectionnée de manière aléatoire, ce qui est un point faible puisque les étiquettes ayant un fort potentiel ne sont pas explorées en priorité.

Il existe une propriété, qui si elle est exploitée, permet d'améliorer l'efficacité des algorithmes : lors de l'exploration des différents chemins par l'algorithme, un certain nombre de chemins peut être exclu *a priori* (donc ne pas être visité par l'algorithme), et cela sans compromettre l'admissibilité de l'algorithme (l'algorithme identifie toutes les solutions optimales). De même, certains chemins peuvent être visités en priorité s'ils ont un bon potentiel d'appartenir à un sous-chemin pareto-optimal. Par exemple, si l'on considère un trajet allant de Rio au Cap, les chemins partiels passant par l'océan Pacifique ou l'océan Indien peuvent être rapidement filtrés par l'algorithme, et ce, même si les conditions météorologiques en Atlantique sont très défavorables. Parmi les algorithmes admissibles prenant en compte cette observation, NAMOA* [4] traite du problème de plus court chemin multiobjectif statique. Il s'appuie sur l'utilisation d'heuristiques *optimistes* permettant d'une part d'explorer en priorité les chemins partiels ayant un bon potentiel, et d'autre part de filtrer certaines zones géographiques. Nous proposons d'exploiter la force de cet algorithme.

Un algorithme simpliste consiste à explorer tous les chemins possibles dans le graphe à partir du sommet o, avec une date d'arrivée maximale T_{max}. Tous les chemins explorés sont alors stockés dans un ensemble, duquel sont extraits les chemins pareto-optimaux, solutions du problème. Le nouvel algorithme a pour objectif de tirer profit de l'efficacité de NAMOA*, celle-ci résidant dans deux types de procédures : la procédure d'élagage et la procédure de filtrage. La première se base sur le principe d'optimalité qui n'est plus valide dans notre cas (propriété 1) : on la supprime. En revanche, l'utilisation de la procédure de filtrage est compatible avec la notion de dépendance temporelle. La preuve est très semblable à son homologue dans le contexte des graphes statiques avec la notion de variation de temps encapsulée.
Finalement, on décide d'adjoindre à l'algorithme simpliste la procédure de filtrage de NAMOA*, ainsi que l'ordre d'exploration des chemins suivant leur potentiel à fournir une solution pareto-optimale.

4 Futurs travaux

Il s'agira par la suite de comparer ces deux algorithmes et d'évaluer leur efficacité en fonction des données d'entrée. On pourra notamment évaluer l'influence de la granularité spatiale et temporelle sur la qualité des algorithmes.

Références

[1] Michael R. Garey and David S. Johnson. *Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman & Co., New York, NY, USA, 1979. 5.

[2] Horst W. Hamacher, Stefan Ruzika, and Stevanus A. Tjandra. Algorithms for time-dependent bicriteria shortest path problems. *Discrete Optimization*, 3(3) :238 – 254, 2006. 9.

[3] X. Gandibleux M. Ehrgott. *Multiple Criteria Optimization*. State of the Art Annotated Bibliographic Surveys, Boston, 2002.

[4] L. Mandow and J.L. Perez De La Cruz. A new approach to multiobjective a* search. In *Proceedings of the XIX International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2005. 8.

[5] Aphrodite Veneti, Charalampos Konstantopoulos, and Grammati Pantziou. Continuous and discrete time label setting algorithms for the time dependent bi-criteria shortest path problem. *Computing Society Conference*, pages 62–73, 2015. 8.