

Optimisation dans l'industrie pétrolière : problèmes de mélange et de localisation

Responsable du projet :

Pierre Hansen

GERAD et École des Hautes Études Commerciales

Tél. : 514) 340-6053 poste 5675

Fax : (514) 340-5665

Courriel: pierreh@crt.umontreal.ca

Chercheurs principaux :

Charles Audet

Université Rice, Houston, Texas

Jack Brimberg

GERAD et Université de l'Île-du-Prince-Édouard

Teodor Crainic

CRT et Université de Montréal

Michel Gendreau

CRT et Université de Montréal

Brigitte Jaumard

GERAD et École Polytechnique de Montréal

Gilles Savard

GERAD et École Polytechnique de Montréal

Chercheur externe :

Frédéric Messine
partiel)

Université de Pau, France (post-doctorat à temps

Introduction

Les résultats obtenus jusqu'ici sont décrits dans le rapport d'étape ci-joint. Il s'agit principalement:

- d'un algorithme exact de type "branch-and-cut" pour les programmes quadratiques à contraintes quadratiques;
- d'une étude de son application aux problèmes de mélange (pooling problems);
- de l'application de l'heuristique de Recherche à Voisinage Variable à de tels problèmes et à des problèmes de localisation de puits.

Projet de recherche

Une première voie de recherche consiste en l'extension de l'algorithme "branch-and-cut" pour les programmes quadratiques à contraintes quadratiques:

- a) Utilisation dans cet algorithme d'une relaxation non linéaire; ceci suppose l'obtention de nouveaux théorèmes sur les séparations optimales et le codage de l'algorithme résultant avec le programme MINOS comme sous-routine (thèse de maîtrise).
- b) Exploitation de la théorie de la dualité pour les programmes quadratiques généraux afin d'intégrer à l'algorithme des tests basés sur le dual et les relations primales-duales (thèse de doctorat).
- c) Intégration du modèle et de l'algorithme pour le problème de pooling dans un modèle de gestion de raffinerie ainsi que dans le logiciel correspondant. Le programme OPLAR développé conjointement par le GERAD et le CETAI pourrait servir à cet effet. Des données réelles pourraient être fournies par ULTRAMAR ou PÉTRO Canada, compagnies avec lesquelles nous avons des contacts, ou par des participants du programme PROGENER du CETAI travaillant dans l'industrie pétrolière (thèse de maîtrise).

Une seconde voie de recherche consiste en le développement des algorithmes heuristiques et exacts pour la localisation de puits ou de plates-formes en mer.

- d) La métaheuristique de Recherche à Voisinage Variable devrait être étendue pour pouvoir s'appliquer à des problèmes de localisation de très grande taille. En effet, le choix des emplacements pour localiser les puits dans un gisement, la géométrie de ses puits et leurs dérivations possibles impliquent une combinatoire très élevée. Les problèmes du type p -médiane résultants comporteraient des dizaines, voire des centaines, de milliers de points (plutôt que quelques milliers à l'heure actuelle). En plus de la décomposition, la parallélisation de RVV semble indispensable (stagiaires et thèse de maîtrise).
- e) Le problème de la localisation de plates-formes en mer peut être modélisé comme un problème de Weber à sources multiples, ainsi que l'a montré Rosing. C'est alors l'équivalent dans le plan du modèle de la p -médiane. Nous envisageons de résoudre de tels problèmes par génération de colonnes stabilisée.

Nous espérons obtenir des résultats significatifs sur ces cinq points d'ici 2001. Plusieurs d'entre eux, notamment le point b), seront encore étudiés après cette date. Les logiciels obtenus seront appliqués à des problèmes réels, avec des données d'ULTRAMAR ou

L'équipe de recherche comprenait au départ Pierre Hansen, responsable du projet, ainsi que Brigitte Jaumard et Gilles Savard. Tous trois sont des spécialistes de l'optimisation globale. Ils ont écrit de nombreux articles sur ce sujet (notamment un article écrit conjointement et décrivant le meilleur algorithme actuel pour les programmes linéaires biniveaux, "New Branch-and-Cut Rules for Bilevel Linear Programming" SIAM journal on Statistical and Scientific Computing, 1992). Frédéric Messine, de l'université de Pau et des Pays de l'Adour, France, spécialiste de l'analyse d'intervalles en optimisation globale, participe aussi aux travaux en ce domaine. L'équipe a bénéficié de l'aide de Nenad Mladenovic, ancien vice-recteur pour la recherche de la faculté d'administration de l'université de Belgrade et professionnel de recherche au GERAD; il a inventé la métaheuristique RVV, développée conjointement avec Pierre Hansen. Plus récemment, Jack Brinberg, professeur et vice-doyen de l'université de l'Île-du-Prince-Édouard, également spécialiste des métaheuristicques, en particulier de la RVV, s'est joint à l'équipe. Il est notamment l'auteur, avec Pierre Hansen, Nenad Mladenovic et Éric Taillard, d'un article sur l'application de la RVV au problème de localisation de Weber à plusieurs sources (l'équivalent dans le plan des problèmes de la p -médiane, défini dans un espace discret) à paraître dans Operations Research. Les compétences de l'équipe en matière de conception, mise au point et programmation des algorithmes exacts et heuristiques d'optimisation globale sont donc bien établies.

Il manquait cependant une expertise concernant le parallélisme. C'est pourquoi Michel Gendreau et Teodor Crainic, tous deux spécialistes de l'algorithmique parallèle et des métaheuristicques, se sont joints à l'équipe pour le présent projet. Ceci aura pour effet de resserrer encore les liens de collaboration entre le GERAD et le CRT.

Rapport d'étape

Depuis les travaux de Charnes et Cooper, au début des années 50, la Recherche Opérationnelle est largement utilisée dans l'industrie pétrolière. Bien que de nombreux processus (par exemple la distillation ou le craquage catalytique) soient régis par des équations non linéaires, on se contente souvent d'approximations afin de pouvoir recourir à la programmation linéaire. C'est ce que font, par exemple, les programmes, largement utilisés, de la firme Haverly Inc. Dans certains cas, comme les problèmes de mélange avec étapes intermédiaires (pooling problems), une formulation bi-linéaire et des heuristiques simples, menant à un optimum local, sont utilisées. Citons notamment la programmation linéaire séquentielle et la programmation linéaire alternée.

Les sommes en jeu étant énormes, une meilleure résolution de tels problèmes d'optimisation globale en gestion pétrolière entraînerait des économies très considérables. Les recherches faites dans le cadre du rcm_2 vont dans ce sens. Elles ont été subventionnées par ULTRAMAR Inc. et plus récemment par le CETAI dans le cadre de son programme PROGENER. Ces recherches prolongent les travaux effectués par l'équipe d'optimisation combinatoire et globale du GERAD depuis une dizaine d'années. (Pierre Hansen, Brigitte Jaumard, Gilles Savard, Jack Brimberg, Nenad Mladenovic et leurs étudiants). Elles portent sur la résolution exacte et approchée de problèmes de mélange ainsi que sur des problèmes de localisation de plates-formes en mer ou de puits à forer pour exploiter optimalement un gisement donné.

L'outil de base développé pour les problèmes de mélange (pooling problems) est un algorithme nouveau de séparation et coupes (branch-and-cut algorithm) pour les programmes quadratiques à contraintes quadratiques. Cet algorithme exploite la notion nouvelle de séparation minimisant l'erreur d'approximation extérieure maximale, caractérisée dans plusieurs théorèmes. Les résultats expérimentaux montrent qu'il est nettement supérieur aux méthodes proposées auparavant; il fait l'objet d'une publication [1] parue récemment dans *Mathematical Programming* (revue classée première sur 38 en Recherche Opérationnelle par le *Journal Citation Report*).

La mise au point de cet algorithme a donné un résultat imprévu, la résolution d'un problème ouvert de géométrie posé par le célèbre mathématicien R. Graham en 1975 : déterminer l'octogone de diamètre unité ayant la plus grande surface. Un article sur ce sujet [2] est en cours de rédaction et sera soumis au *Journal of Global Optimization*.

Des recherches sont en cours pour l'application de cet algorithme à des problèmes de mélange de la littérature ou de la firme VEBA Oel Inc. Il apparaît d'ores et déjà que plusieurs formulations sont possibles, basées sur les flux ou bien sur les

Le choix des puits à creuser pour exploiter un gisement pétrolifère, ainsi que de leur profondeur et de leurs dérivations, peut être exprimé comme un très grand problème de p -médiane. La RVV a été combinée avec une méthode de décomposition pour ce cas, donnant un algorithme beaucoup plus rapide et performant que l'application directe de la RVV ou les autres heuristiques disponibles. Un article sur ce sujet [4] doit paraître dans le *Journal of Heuristics*. De plus, la combinaison de l'heuristique RVV avec une méthode de génération de colonnes stabilisée permet la résolution exacte de problèmes de p -médiane trois fois plus grands qu'auparavant, comme l'explique un article récemment paru dans *Discrete Mathematics* [5].

La RVV a également été appliquée avec succès au problème de localisation de Weber multi-source; Rosing a proposé d'utiliser ce modèle pour la localisation de plates-formes en mer. Un article écrit par Jack Brimberg, Pierre Hansen, Nenad Mladenovic et Éric Taillard [6] sur ce sujet est accepté pour publication dans *Operations Research*.

Ces résultats ont été présentés par Pierre Hansen comme suit :

- conférence semi-plénière au congrès EURO XVI, Bruxelles, août 1998;
- conférence plénière inaugurale à la deuxième Conférence Internationale de Recherche Opérationnelle, Marrakech, mai 1999;
- conférence plénière au congrès international ISOLDE VIII, Coimbra, juin 1999;

et par Nenad Mladenovic:

- conférence plénière à la troisième Metaheuristics International Conference 99, Angra dos Reis, Brésil, juillet 1999;

ainsi qu'à diverses autres conférences.

Le projet utilise la nouvelle métaheuristique de Recherche à Voisinage Variable, mise au point au GERAD depuis 1996. Cette méthode s'applique également à la résolution de divers problèmes de Recherche Opérationnelle et d'Intelligence Artificielle (voir liste de publications ci-dessous).

En particulier, cette méthode a permis la découverte de relations nouvelles dans les graphes chimiques. Cette voie de recherche pourrait être approfondie et mener à une approche originale de la recherche de médicaments nouveaux, si un partenaire industriel du domaine s'y intéressait.

aussi étudiée avec l'équipe de Binay Bhattacharya, Simon Fraser University, dans le cadre du réseau MITACS.

Les travaux du programme de recherche décrit ci-dessus ont fait l'objet de recherche post-doctorales de Charles Audet et Stéphane Krau, ainsi que de la thèse de maîtrise de Naoufel Thabet.

Publications

1. Audet, C., Hansen, P., Jaumard, B., Savard, G., *A Branch-and-Cut algorithm for Quadratically Constrained Quadratic Programming*, Mathematical Programming A87 (2000) 131-152.
2. Audet, C., Hansen, P., Messine, F., Xiong, J., *The Largest Small Octagon*, (en préparation, à soumettre au Journal of Global Optimization).
3. Audet, C., Brimberg, J., Hansen, P., Mladenovic, N., *"Pooling Problems: Alternate Formulations and Algorithms* (soumis à Management Science).
4. Hansen, P., Mladenovic, N., Perez-Britto, D., *Variable Neighborhood Decomposition Search*, Journal of Heuristics (à paraître).
5. du Merle, O., Villeneuve, D., Desrosiers, J., Hansen, P., *Stabilized Column Generation*, Discrete Mathematics 194 (1999) 229-237.
6. Brimberg, J., Hansen, P., Mladenovic, N., Taillard, E., *"Improvements and Comparison of Heuristics for Solving the Multisource Weber Problem*, Operations Research (à paraître).

Articles sur la Recherche à Voisinage Variable

1. Mladenovic, N., Hansen, P., *Variable Neighbourhood Search*, septembre 1996, Les Cahiers du GERAD G-96-49, révisé: juin 1997, 11 pages. Computers and Operations Research, 24-1097-1100, 1997.
2. Hansen, P., Mladenovic, N., *Variable Neighbourhood Search for the p-Median*, juin 1997, Les Cahiers du GERAD G-97-39. Révisé: octobre 1997, 29 pages. Location Science, 5(4):207-226,1998.
3. Caporossi, G., Hansen, P., *Variable Neighborhood Search for Extremal Graphs. 1. The AutoGraphiX System*, juin 1997, Les Cahiers du GERAD G-97-41. Révisé: septembre 1997, 25 pages. Discrete Mathematics 212.-29-44, 2000.
4. Hansen, P., Mladenovic, N., *An Introduction to Variable Neighbourhood Search*, juillet 1997, Les Cahiers du GERAD G-97-51. Révisé: février 1998, 30 pages. Metaheuristics, Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization, S. Voss et al. editors, pp. 433--458, Kluwer, Dordrecht, 1999.
5. du Merle, O., Hansen, P., Jaumard, B., Mladenovic, N., *An Interior Point Algorithm for Minimum Sum-of-Squares Clustering*, août 1997, Les Cahiers du GERAD G-97-53. Révisé : janvier 1999, 27 pages. SIAM journal on Scientific Computing, 21(4):1485-1505, 2000.
6. Hansen, P., Mladenovic, N., *Variable Neighborhood Search: Principles and Applications*, mai 1998, Les Cahiers du GERAD G-98-20. Révisé: mars 2000, 28 pages.
7. Caporossi, G., Cvetkovic, D., Gutman, I., Hansen, P., *Variable Neighborhood Search for Extremal Graphs 2. Finding Graphs with Extremal Energy*, août 1998, Les Cahiers du GERAD G-98-44. Révisé: février 1999, 37 pages. Journal of Chemical Information and Computer Sciences, 39:984--996,1999.
8. Cvetkovic, D., Simic, S., Caporossi, G., Hansen, P., *Variable Neighborhood Search for Extremal Graphs. 3. On the Largest Eigenvalue of Color-Constrained Trees*, décembre 1998, Les Cahiers du GERAD G-98-66. Révisé. avril 2000,18 pages.
9. Caporossi, G., Gutinan, I., Hansen, P., *Variable Neighborhood Search for Extremal Graphs. 4. Chemical Trees with Extremal Connectivity Index*, décembre 1998, Les Cahiers du GERAD G-98-67. Révisé: avril 1999, 18 pages. Computers & Chemistry, 23.469-477,1999.
10. Caporossi, G., Hansen, P., *Finding Relations in Polynomial Time*, janvier 1999, Les Cahiers du GERAD G-99-09. Révisé: avril 1999,15 pages.
11. Caporossi, G., Dobrynin, A. A., Gutman, I., Hansen, P., *Trees with Palindromic*

13. Hansen, P., Mladenovic, N., *J-MEANS: A New Local Search Heuristic for Minimum Sum-of-Squares Clustering*, février 1999, Les Cahiers du GERAD G-99-14.
Révisé: octobre 1999, 16 pages.
14. Hansen, P., Mladenovic, N., *First Improvement may be Better than Best Improvement: An Empirical Study*", octobre 1999, 23 pages, Les Cahiers du GERAD G-99-40.
15. Hansen, P., Mladenovic, N., *Variable Neighborhood Search: A Chapter of Handbook of Applied Optimization* février 2000, 20 pages, Les Cahiers du GERAD G-2000-03.
16. Hansen, P., Mladenovic, N., *Recherche à Voisinage Variable*, mars 2000, 20 pages, Les Cahiers du GERAD G-2000-08.