

Optimisation de mouvements de terre sur des chantiers linéaires de terrassement

Antoine Jeanjean

Bouygues e-lab, Paris / LIX, UMR CNRS 7161, École Polytechnique, F-91128 Palaiseau

ajeanjean@bouygues.com

Nous abordons ici un problème de planification des mouvements de terre par engins de terrassement. Ce problème prend comme entrée la solution optimale d'un problème de transport de masse, de type *Monge-Kantorovich*. Ce problème, initialement introduit par Monge [8] en 1781 dans son *Mémoire sur la théorie des déblais et des remblais*, est revisité par Kantorovich [6] en 1942 et Dantzig [3] en 1949. Dans notre cas, il s'agit de planifier des ressources réalisant des mouvements de terre entre des ouvrages placés sur un axe linéaire pendant plusieurs mois. Ce problème est proposé par Bouygues Construction DTP Terrassement, l'un des leaders du terrassement en France. L'entreprise gère une flotte de 900 engins dont 600 à l'étranger. Afin d'optimiser la gestion de cette flotte de ressources, DTP Terrassement souhaite optimiser les mouvements de terre sur ses chantiers linéaires, composé de 50 à 400 ouvrages. Les ouvrages sont de deux types : les déblais d'où on doit extraire des matériaux et inversement les remblais où on doit amener des matériaux. En partant du profil altimétrique initial du chantier, on cherche à déplacer de la terre depuis ces déblais vers les remblais afin d'atteindre un profil cible. Chaque ouvrage est défini par son centre de gravité sur l'axe, la liste des couches de matériaux le composant ou devant le composer. Pour chaque couche, on connaît la quantité de matériaux associée. Un mouvement de terre va consister à déplacer une certaine quantité de matériau d'une couche origine vers une couche destination, pendant une période incluse dans les fenêtres de temps autorisées pour ce mouvement. La durée d'un mouvement de terre peut varier de quelques jours à plusieurs mois. Pour les réaliser, on utilise des ressources appelées échelons, qui sont des engins de terrassement combinant des fonctions d'extraction et de transport, dont le rendement est exprimé en volume traité par heure. Chaque ressource est disponible suivant un calendrier respectant les heures de travail journalier. Certaines plages horaires sont neutralisées en fonction des contraintes météorologiques ou de disponibilité. De plus, on connaît pour chaque mouvement de terre une liste d'échelons autorisés. A notre connaissance, il n'y a pas de papier introduisant un modèle d'optimisation des allocations pour résoudre des instances d'une telle taille, avec des plannings journaliers. On trouve dans la littérature des approches par simulation [1,2,4,7]. Un chantier peut contenir jusqu'à 400 ouvrages, 800 mouvements de terre, 50 échelons sur une échelle temporelle pouvant dépasser les 2 ans avec des fenêtres de temps journalières.

Le problème de transport de masse calcule la liste optimale de mouvements de terre à effectuer sur le site de construction, en minimisant le moment total de transport (le produit de la quantité transportée par la distance entre les ouvrages source et destination). Ce problème est résolu efficacement par programmation linéaire. Le problème présenté ici prend comme entrée la liste des mouvements de terre résultant de ce problème. On cherche à planifier ces mouvements de terre dans le temps en y associant une ou plusieurs ressources disponibles, tout en respectant les contraintes de précédences. L'objectif est de minimiser les coûts de location et de déplacement des ressources. Les coûts de location sont payés par ressource

depuis la première date de livraison jusqu'à la fin de sa dernière tâche, plus un coût fixe par ressource. Les coûts de déplacement sont proportionnels à la distance parcourue par les ressources, entre les sources des mouvements de terre de ses tâches.

Afin de résoudre efficacement ce problème d'optimisation combinatoire difficile, nous avons développé une heuristique de Recherche Locale. La conception et l'implémentation de cet algorithme suivent la méthodologie, en 3 couches, présentée dans [5] : stratégie de recherche, mouvement et algorithmique d'évaluation. Un algorithme glouton permet de faire une affectation multiple de façon à minimiser le nombre de mouvements de terre non affectés. Puis, la recherche locale débute avec une stratégie de descente avec choix aléatoire des mouvements. Les mouvements consistent à créer, déplacer, supprimer une tâche ou un groupe de tâches d'une ressource à une autre ou au sein d'une même ressource. Une phase préliminaire est ajoutée ici, pendant laquelle l'objectif est de minimiser la quantité totale non affectée. Lorsqu'une solution faisable est trouvée, l'algorithme se concentre sur son objectif principal, la minimisation du coût des ressources. Deux aspects cruciaux impactent fortement ici l'efficacité de la recherche locale. Tout d'abord, chaque transformation doit respecter strictement le graphe de précédences entre les couches. Si une tâche est modifiée par un mouvement, la fenêtre de temps courante dans laquelle elle peut être déplacée doit être strictement respectée en fonction de ses prédécesseurs et successeurs. Ensuite, on évite ici d'énumérer les longues listes de fenêtres de temps en manipulant des tâches s'étendant sur plusieurs fenêtres de temps et en pré-calculant des structures de données appropriées. Ainsi, on est en mesure d'évaluer environ 120 000 mouvements par seconde avec un taux d'acceptation de 8 % et un taux d'amélioration de 0,016 %. Ces performances assurent une large diversité de la recherche locale et une convergence vers des solutions de qualité. Cet algorithme a été testé sur une douzaine d'instances réelles et le logiciel qui l'intègre est désormais en exploitation dans la filiale de Bouygues Construction, DTP Terrassement.

Références

1. W.H. Askew, S.H. Al-Jibouri, M.J. Mawdesley, D.E. Patterson (2002). Planning linear construction projects : automated method for the generation of earthwork activities *Automation in construction* 11 (6). pp. 643-653.
2. J. Christian and H. Caldera (1988). Earthmoving cost optimization by operational research. In *Canadian journal of civil engineering*, pp. 679-684.
3. G.B. Dantzig. (1949). Application of the simplex method to a transportation problem. In *Activity Analysis of Production and Allocation*, Proceedings Conference on Linear Programming, Chicago, Illinois, T.C. Koopmans.
4. S.M. Easa (1988). Earthwork allocation with linear unit costs. *Journal of Construction Engineering and Management*, 114(2) :641-655.
5. B. Estellon, F. Gardi, K. Nouioua (2009). Recherche locale haute performance pour la planification des interventions à France Télécom. In *SLS 2009*, Bruxelles, Belgique.
6. Kantorovich, L.V. (1948). On a problem of Monge. *Uspekhi Mat. Nauk.* 3, 225-226.
7. M.J. Mawdesley, S.H. A-Jibouri, W.H. Askew, D.E. Patterson (2002). A model for the automated generation of earthwork planning activities, *Construction Innovation* 2 (2). pp. 249-268.
8. G. Monge. (1781). Mémoire sur la théorie des déblais et des remblais. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Paris.