



CIRRELT

Centre interuniversitaire de recherche
sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport

Interuniversity Research Centre
on Enterprise Networks, Logistics and Transportation

Une revue des méthodes pour l'ordonnancement de projets avec contraintes de ressources ou de matériel

Jean-Baptiste Boucherit
Robert Pellerin
Adnène Hajji
Nathalie Perrier

Mai 2011

CIRRELT-2011-34

Bureaux de Montréal :

Université de Montréal
C.P. 6128, succ. Centre-ville
Montréal (Québec)
Canada H3C 3J7
Téléphone : 514 343-7575
Télécopie : 514 343-7121

Bureaux de Québec :

Université Laval
2325, de la Terrasse, bureau 2642
Québec (Québec)
Canada G1V 0A6
Téléphone : 418 656-2073
Télécopie : 418 656-2624

www.cirrelt.ca

Une revue des méthodes pour l'ordonnancement de projets avec contraintes de ressources ou de matériel

Jean-Baptiste Boucherit^{1,2}, Robert Pellerin^{1,2}, Adnène Hajji^{1,3},
Nathalie Perrier^{1,2,*}

- ¹ Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport
- ² Département de mathématique et de génie industriel, École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, Succursale Centre-ville, Montréal, Canada H3C 3A7
- ³ Département des opérations et systèmes de décision, Université Laval, 2325, de la Terrasse, Québec, Canada G1V 0A6

Résumé. La gestion de projets est une discipline complexe impliquant de nombreux acteurs, sous-traitants et parties prenantes, et nécessitant le transport, l'approvisionnement et la livraison d'équipement et de matériel. Dans ce contexte, les délais d'approvisionnement et les problèmes de capacité de stockage peuvent entraîner des dépassements de coûts et des retards dans le déroulement des projets. En dépit des efforts accomplis pour développer des outils efficaces pour la gestion de projets, les contraintes de livraison et d'approvisionnement de matériel sont souvent traitées, lors de la phase de planification de projets, de façon manuelle par le gestionnaire de projets, selon son intuition et son expérience. Ce travail montre que les méthodes et les algorithmes développés jusqu'à maintenant sont utilisés en pratique pour la gestion de projets dite traditionnelle, ne considérant qu'un projet unique de faible portée, sans contraintes logistiques de matériel.

Mots-clés. Planification de projet, logistique, contraintes d'espace, projet international.

Remerciements. Cet article a bénéficié du support financier de la Chaire de recherche Jarislowsky / SNC-Lavalin en Gestion de projets internationaux et du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).

Results and views expressed in this publication are the sole responsibility of the authors and do not necessarily reflect those of CIRRELT.

Les résultats et opinions contenus dans cette publication ne reflètent pas nécessairement la position du CIRRELT et n'engagent pas sa responsabilité.

* Auteure correspondante: Nathalie.Perrier@cirrelt.ca

1. Introduction

La concurrence internationale et la globalisation des marchés forcent les entreprises à adopter des méthodes de gestion de plus en plus efficaces afin de demeurer compétitives. Le fonctionnement par projets figure parmi les méthodes de gestion les plus répandues. Cette méthode consiste à allouer des ressources financières, humaines et matérielles ainsi qu'à établir un échéancier et un suivi du déroulement des activités planifiées de façon à atteindre des objectifs précis, tout en respectant un ensemble de contraintes et d'exigences spécifiques. Dans un contexte international, les problèmes liés à la gestion de projets sont très complexes en raison de la grande taille des projets et de la présence de contraintes logistiques additionnelles associées principalement à la dispersion géographique des ressources sur plusieurs sites de construction et à la délocalisation des activités qui entraînent des besoins importants de transport et d'entreposage.

Au fil des années, de nombreuses méthodes d'ordonnancement de projets ont été développées. Leur efficacité a surtout été démontrée en gestion traditionnelle de projets, dans le but d'encadrer l'exécution de projets uniques réalisés sur un site principal à proximité du maître d'œuvre. Aussi, la majorité de ces méthodes s'avère inadéquate dans le cadre de projets internationaux. En effet, près de la moitié des projets internationaux dépassent les délais d'achèvement ou ne produisent pas les bénéfices escomptés (Lientz et Rea, 2003). D'où la nécessité d'apporter une réponse concrète à la demande grandissante des entreprises en outils fiables, dédiés à la planification et au contrôle de projets internationaux.

En fait, malgré les nombreux travaux effectués sur le problème d'ordonnancement de projets, les caractéristiques propres au contexte international sont souvent négligées. D'une part, les méthodes exactes proposées dans la littérature ne permettent pas de traiter des projets internationaux comprenant des centaines d'activités. Bien que les approches heuristiques et métaheuristiques paraissent mieux adaptées pour ces projets, leur performance varie d'un projet à l'autre et peu de tests ont été effectués sur des projets de grande taille. D'autre part, les méthodes actuelles d'ordonnancement de projets considèrent essentiellement les contraintes en ressources humaines, ignorant les contraintes logistiques fréquentes dans bon nombre de projets. La gestion des ressources matérielles et de leur approvisionnement est pourtant une fonction vitale dans tout projet en raison de l'importance des coûts et des délais d'exécution qu'elle peut engendrer (Tserng et al., 2006).

La prise en compte des contraintes logistiques commence à se répandre et se généraliser en gestion traditionnelle de projets, mais elle demeure toutefois difficilement applicable dans un contexte international. En effet, la conduite de projets à l'étranger est souvent plus complexe et plus risquée du fait de l'utilisation de nouveaux fournisseurs locaux et du transport de matériel et d'équipement sur de plus grandes distances. Le contexte international oblige ainsi à coordonner les activités logistiques en tenant compte des contraintes de livraison et de stockage sur les sites de construction. Or, ces contraintes, peu abordées dans la littérature, sont surtout traitées de façon isolée.

Ainsi, malgré les progrès récents, les méthodes de résolution et les outils de planification de projets ne permettent pas, actuellement, d'intégrer l'ensemble des contraintes de matériel et de ressources ainsi que les conflits d'utilisation de l'espace d'entreposage. Dans ce travail, nous décrivons les méthodes développées jusqu'à maintenant pour le problème d'ordonnement de projets avec contraintes de ressources. Nous présentons également les travaux récents intégrant les contraintes de matériel et de ressources.

Le plan du rapport s'établit comme suit. La Section 2 décrit le problème de base et présente l'état actuel de la recherche dans le domaine de l'ordonnement de projets avec contraintes de ressources. Un regard est aussi porté sur les systèmes de planification et de contrôle de projets. La Section 3 introduit des contraintes logistiques au problème de base. La Section 4 est consacrée aux travaux qui incluent le traitement des contraintes logistiques de matériel en gestion de projets, telles les contraintes reliées à la gestion de l'espace de construction et de l'approvisionnement. Enfin, le rapport se conclut sur une discussion des pistes de recherche.

2. Ordonnement de projets avec contraintes de ressources

2.1. Problématique de base

Le problème d'ordonnement de projets avec contraintes de ressources (Resource-Constrained Project Scheduling, RCPS) a été formalisé pour la première fois par Pritsker et al. (1969). Étant donné un ensemble d'activités à réaliser, ce problème consiste à déterminer l'ordre d'exécution dans le temps d'un ensemble d'activités de façon à minimiser la durée totale du projet tout en respectant les contraintes de précédence et les contraintes en ressources humaines. Le problème RCPS peut être formulé comme un programme linéaire mixte. Dans ce modèle, le projet est représenté par un graphe orienté $G = (V, E)$ où V est l'ensemble des sommets correspondant aux activités et E , l'ensemble des arcs indiquant l'ordre des activités selon des relations de précédence (Brucker et al., 1999). Dans G , chaque couple (i, j) est représenté par une relation de précédence $i \rightarrow j$, correspondant à un arc dans l'ensemble E et indiquant que l'activité j ne peut démarrer avant la fin de l'activité i . La durée d'exécution de l'activité i est donnée par p_i . Soit R , l'ensemble des ressources humaines disponibles. Le nombre d'unités de ressources humaines de type k disponibles est noté R_k et r_{ik} représente le nombre d'unités de ressources humaines k requises par l'activité i . La variable binaire x_i^t est égale à 1 si l'activité i débute à l'instant t et 0 sinon. Les variables non négatives S_i et C_{\max} dénotent respectivement l'instant où débute l'activité i et la durée du projet. Le modèle pour le problème d'ordonnement classique s'écrit comme suit :

Minimiser

$$C_{\max} \quad (1)$$

sous les contraintes

$$C_{\max} \geq S_i + p_i \quad (i \in V) \quad (2)$$

$$S_i + p_i \leq S_j \quad ((i, j) \in E) \quad (3)$$

$$\sum_{t=1}^T tx_i^t = S_i \quad (i \in V) \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^T x_i^t = 1 \quad (i \in V) \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{s=\max\{1,t-p_i+1\}}^t r_{ik} x_i^s \leq R_k \quad (t=1,\dots,T, k \in R) \quad (6)$$

$$S_i \geq 0 \quad (i \in V) \quad (7)$$

$$C_{\max} \geq 0 \quad (8)$$

$$x_i^t \in \{0,1\} \quad (i \in V, t=1,\dots,T) \quad (9)$$

La fonction-objectif (1) minimise la durée du projet. Les contraintes (2) garantissent que chaque activité soit parachevée avant la fin du projet. Les contraintes de précédence (3) définissent les conditions temporelles entre les activités. Ainsi, pour chaque couple (i, j) , la relation de précédence $i \rightarrow j$ doit être respectée. Les contraintes (4) relient les variables x_i^t et S_i . Les contraintes (5) imposent que chaque activité du projet soit exécutée exactement une fois. Les contraintes en ressources humaines (6) assurent que le nombre d'unités de ressources humaines requises pour chaque type n'excède pas la limite disponible à tout instant. Enfin, les contraintes (7) et (8) déclarent les variables non négatives et les contraintes (9), les variables binaires.

Depuis plus de trente ans, le problème RCPS a été abondamment étudié dans la littérature. Ce problème est NP-difficile au sens fort (Blazewicz et al., 1983) en raison de la nature cumulative de la consommation des ressources qui permet l'exécution d'activités en parallèle. Au cours des mêmes décennies, un grand nombre de méthodes permettant de traiter les contraintes logistiques sont également apparues. Toutefois, l'attention est principalement portée, et ce depuis de nombreuses années déjà, sur le traitement des conflits en ressources humaines. Aussi, au cours des dernières décennies, le problème RCPSP est devenu un problème classique en gestion de projets (Hartmann et Briskorn, 2010). Les méthodes proposées se différencient principalement par la fonction-objectif (minimiser la durée du projet, minimiser les coûts, maximiser la robustesse de la solution), la nature des activités et la méthode de résolution retenue (Demeulemeester et Herroelen, 2002). Les méthodes proposées pour le problème RCPS sont décrites dans les sous-sections suivantes.

2.2. Méthodes exactes

Les premiers travaux portent sur la formulation du problème RCPS comme un programme linéaire en nombres entiers (Pritsker et al., 1969) qui est résolu par une méthode de séparation et d'évaluation progressive (en anglais, branch-and-bound; Brucker et al., 1998; Demeulemeester et Herroelen, 1997; Mingozi et al., 1998; Sprecher, 2000). Des travaux ont permis le développement de bornes inférieures (Artigues et Demasse, 2005) et de règles de dominance adéquates (Klein et Scholl, 1999). Toutefois, la méthode de séparation et d'évaluation progressive demeure difficilement applicable à des projets de plus de 60 activités (Artigues et Demasse, 2005).

2005). En effet, la linéarisation des contraintes de ressources augmente considérablement la taille des modèles, la résolution exacte ne pouvant alors être envisagée que pour l'ordonnement de projets comprenant quelques dizaines d'activités. Aussi, les approches exactes sont principalement développées pour résoudre des problèmes simples de façon à tester la qualité des solutions obtenues à l'aide d'autres approches (Hartmann, 1999). Plus récemment, des résultats intéressants ont été obtenus en utilisant des approches hybrides qui combinent la méthode de séparation et d'évaluation progressive et des heuristiques (Cheng et Wu, 2006).

2.3. Heuristiques

Afin de pouvoir malgré tout traiter ces problèmes, les chercheurs ont développé des méthodes heuristiques qui utilisent diverses règles de priorité pour générer des échéanciers réalisables dans un délai acceptable.

Différents schémas de génération d'échéanciers peuvent être utilisés. Les deux principaux schémas, sériel et parallèle, sélectionnent les activités éligibles pour la planification à chaque itération. Pour le schéma sériel, l'activité constitue l'incrément, alors que le schéma de génération parallèle est incrémenté de manière temporelle (Kolisch et Hartmann, 1999). D'autres schémas ont été développés : la méthode de séparation des lots, les schémas de recyclage matériaux et les schémas de recherche stochastique des prédécesseurs (Tang et Tang, 2008). Les activités sélectionnées pour la planification (phase I) sont ensuite ordonnées selon différentes règles heuristiques pour former l'échéancier (phase II). Les règles de priorité dynamiques, par exemple, évoluent au cours du temps en fonction des allocations passées (Pellerin, 1997).

Des études effectuées sur les performances des progiciels de gestion de projets montrent que ces systèmes utilisent des règles de priorité simples et peu adaptées à la grande variété des projets existants. La performance de ces progiciels est donc très variable (Herroelen, 2005; Guèvremont, 2009).

2.4. Métaheuristiques

La recherche avec tabous et les algorithmes génétiques (Kolisch et Hartmann, 2006) figurent parmi les métaheuristiques ayant suscité le plus grand intérêt dans la communauté scientifique pour résoudre le problème RCSP. Valls et al. (2003) ont démontré que l'utilisation d'algorithmes génétiques hybrides sur des instances de projets comprenant 120 activités surpasse les meilleures approches heuristiques connues pour le problème RCPS. De plus, Debels et Vanhoucke (2005) ont démontré que l'utilisation d'approches métaheuristiques hybrides permet d'obtenir, dans des délais raisonnables, de meilleurs échéanciers que les règles de priorité simples dans le cas de projets comprenant 300 activités et quatre types de ressources. Les systèmes immunitaires artificiels (Artificial Immune Systems, Farmer et al., 1986) sont également utilisés pour résoudre le problème RCSP (Agarwal et al., 2007). Ces systèmes reproduisent les mécanismes de la mémoire, l'apprentissage et la sélection, inhérents au fonctionnement des systèmes immunitaires naturels. Enfin, le développement de nouvelles approches hybrides est en

plein essor actuellement, comme l'optimisation par essaim particulière (Zhang et al., 2005; Tang et Tang, 2008). Plus récemment, Chen et al. (2010) proposent la méthode ACOSS (Ant Colony Optimization with Scatter Search) qui combine une approche de colonies de fourmis et une méthode de recherche dispersée de points pour résoudre des problèmes RCSP comprenant jusqu'à 120 activités.

2.5. Systèmes de planification et de contrôle de projets

Malgré les progrès récents, des projets affichent encore des retards et des dépassements de budget (Yourdon, 2003). Dans de nombreux cas, cela s'explique par l'inefficacité des processus de planification et de contrôle de projets (Herroelen, 2005).

Aujourd'hui, la majorité des planificateurs de projets utilisent un système de gestion de projets (Liberatore et Pollack-Johnson, 2003). Toutefois, les systèmes d'information en gestion de projets sont surtout utilisés pour répondre à des besoins de représentation et de communication, non d'optimisation. En fait, la plupart des systèmes commerciaux de planification de projet reposent sur des outils de résolution propriétaires et non diffusés. Les planificateurs de projets ont donc une connaissance limitée du fonctionnement des outils qu'ils utilisent (De Reyck et van de Velde, 1999; Deckers, 2001). De plus, la performance des outils d'ordonnancement, qui reposent essentiellement sur des règles heuristiques simples, varie grandement d'un projet à l'autre et semble même diminuer lorsque le nombre d'activités et de contraintes de ressources augmente (Kolisch, 1999; Guèvremont, 2009; Trautmann et Baumann, 2009).

Enfin, les outils de planification de projets ne peuvent pas traiter les processus connexes à la planification de projets, comme la gestion de l'approvisionnement et la gestion du personnel (Dominic, 2008). Centrés uniquement sur les activités de projets, ces outils doivent être utilisés avec d'autres systèmes d'information afin d'obtenir un échéancier réalisable au niveau de l'exécution, du recrutement et de l'approvisionnement. Persona et al. (2004) soulignent que les systèmes d'information sont souvent utilisés séparément par les membres des équipes de projets, les organisations cherchant alors à mettre en place des processus manuels itératifs d'analyse et de validation des plans de projets et d'approvisionnement.

Ainsi, les entreprises développent de plus en plus leurs propres outils de gestion de projets tout en y greffant des outils complémentaires ou en adoptant des outils intégrés de gestion d'entreprise, appelés ERP (Enterprise Resource Planning), pour faciliter la mise en place de processus de planification complets et intégrés.

3. Contraintes logistiques

Dans ce travail, nous considérons également des contraintes logistiques d'entreposage au problème d'ordonnancement classique. En plus des ressources humaines propres au problème RCPS, chaque activité nécessite des matériaux qui doivent être livrés à l'avance avant le démarrage de l'activité afin d'en assurer la disponibilité. Cette politique

d'approvisionnement induit des contraintes d'entreposage pour lesquelles les matériaux doivent être stockés avant et pendant la réalisation des activités, tout en respectant l'espace disponible dans les aires de stockage. Soit m , un indice représentant le numéro d'un type de matériaux à stocker. Les paramètres N_{im} et L_{im} représentent respectivement la quantité de matériau de type m utilisée par l'activité i et le nombre de périodes d'entreposage nécessaires pour le matériau m avant le début de l'activité i .

Nous posons l'hypothèse que l'espace d'entreposage est occupé par les matériaux requis jusqu'à la fin de l'activité associée. Ainsi, l'espace d'entreposage occupé par les matériaux requis pour l'activité i reste constant pendant une durée qui correspond à la somme $L_{im} + p_i$ (Figure 1). Soit γ , un indice représentant le numéro d'un type d'aire de stockage. Le nombre de matériaux pouvant être stockés dans la zone d'entreposage de type γ est noté E_γ . Soit S_γ , l'ensemble des types de matériaux qui peuvent être entreposés dans la même zone d'entreposage γ . Enfin, soit e_{im} , le nombre d'unités de stockage du matériau m requis par l'activité i .

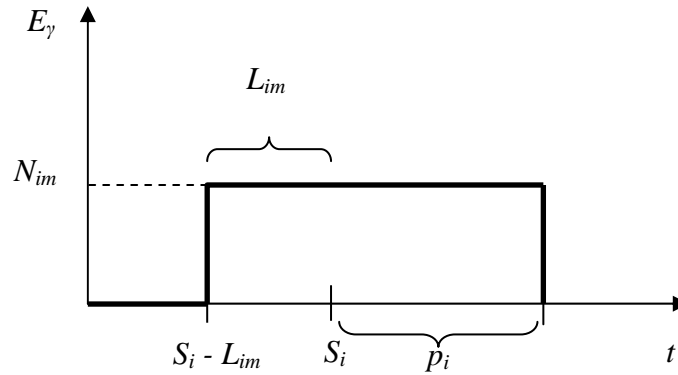


Figure 1. Schéma d'utilisation de la zone d'entreposage pour une activité

Les nouvelles contraintes logistiques sont spécifiées par les contraintes (10). Ces contraintes assurent que l'espace total occupé par les matériaux, à tout instant et à l'intérieur d'un même espace d'entreposage, n'excède pas la capacité de cet espace.

$$\sum_{m \in S_\gamma} \sum_{i \in V} \sum_{s=\max\{0; t-p_i+1\}}^{t+L_{im}} e_{im} x_i^s \leq E_\gamma \quad (t=1, \dots, T, \gamma=1, \dots, \Gamma) \quad (10)$$

4. Gestion de l'espace de construction et de l'approvisionnement

En gestion de projets internationaux, les problèmes logistiques ont un impact considérable sur le budget, la productivité et la rentabilité des projets (Howell and Ballard 1997; Agapiou et al, 1998; Polat et Arditi, 2005; Tserng et al., 2006). Ces problèmes sont dus soit à un mauvais ordonnancement des différents espaces sur le site de construction, surtout au niveau des zones d'entreposage, soit à un processus d'approvisionnement qui néglige les réalités du terrain (Jang, 2004; Guèvremont, 2009). Les travaux liés aux

problèmes de gestion de l'espace de construction et de l'approvisionnement sont présentés dans les sections suivantes.

4.1. Gestion de l'aménagement du site

Les problèmes de gestion de l'espace sur le site de construction impliquent avant tout l'étude de l'aménagement du site (Zouein et al., 2002; Jang, 2004). Des chercheurs ont proposé différentes approches pour le problème d'aménagement du site. Par exemple, Tommelein et al. (1992) ont développé un modèle basé sur les techniques d'intelligence artificielle afin de proposer un aménagement des différents espaces d'un site de construction. De plus, Cheng et O'Connor (1996) et Karan et Ardeshir (2008) ont développé des systèmes d'information géographiques afin d'organiser et de présenter les données référencées. Enfin, Retik et Shapira (1999) ont mis en pratique des techniques de réalité virtuelle afin de simuler et valider la qualité d'un aménagement. Plus récemment, les recherches ont porté sur les métaheuristiques, particulièrement sur les algorithmes génétiques (Elbeltagi et al., 2001; Mawdesley et al., 2002; Tam et al., 2002; Zouein et al., 2002; Osman et al., 2003; Jang, 2004) et les colonies de fourmis (Ning et al., 2010). Toutefois, ces approches sont limitées à l'aspect logistique du problème et ne considèrent pas l'aspect ordonnancement de projets.

4.2. Gestion des conflits d'espace

En gestion de projets, le conflit de temps et d'espace peut engendrer d'importants retards dans la planification (Haque et Rahman, 2009). Diverses stratégies ont donc été élaborées afin de traiter les problèmes de conflits d'espace : la visualisation statique associée au processus de planification, la simulation 4D et les heuristiques.

La visualisation statique consiste à créer des représentations visuelles statiques des zones d'activité associées aux tâches d'un projet afin d'analyser les situations de conflits d'espace de stockage (Cheng et O'Connor, 1996; Jacobus, 1997). Riley et Sanvido (1997) ont proposé une méthodologie pour l'ordonnement de l'espace de construction avec des échéanciers détaillés. Akinci et al. (2002a) ont développé une classification des conflits de temps et d'espace afin de traiter les conflits pouvant se produire durant l'exécution de projets.

L'utilisation de la simulation permet aux planificateurs d'évaluer différents scénarios durant les phases d'ordonnement (Haque et Rahman, 2009). Les méthodes 4D permettent également de simuler les situations de conflits. Ces méthodes font appel à des représentations visuelles en trois dimensions (3D) créées, par exemple, à l'aide du logiciel AutoCAD (Guo, 2002) et couplées à une lecture temporelle des situations de manutention liées aux activités du projet de construction (Akinci et al., 2002b; Bjornfot et Jongeling, 2007; Haque et Rahman, 2009). Akinci et al. (2002b) ont développé un système 4D pour détecter et analyser les conflits de temps et d'espace. Récemment, Winch et North (2006) ont développé un outil d'aide à la décision afin d'analyser les zones de construction et repérer les espaces disponibles pour l'affectation des activités.

Enfin, les méthodes heuristiques permettent de retarder la date de début d'une activité ou de faire varier son niveau de ressources afin de modifier l'occupation des zones de stockage lors des conflits, tout en minimisant l'augmentation de la durée du projet (Zouein et Tommelein, 2001). Dawood et Sriprasert (2006) ont développé un algorithme génétique pour résoudre des problèmes d'optimisation multicritères. L'algorithme élimine les conflits de temps et d'espace dus à une surcharge des zones d'activité, tout en minimisant la durée du projet ainsi qu'une fonction de coût. Mallasi (2009) étudie les systèmes hybrides 4D en intégrant des algorithmes génétiques pour déterminer la meilleure stratégie de planification sans conflit d'espace entre les activités.

4.3. Gestion de l'approvisionnement en matériel

La gestion de l'approvisionnement constitue une composante cruciale de la planification de projets de construction (Kini, 1999; Koushki et Kartam, 2004; Laedre et al., 2006; Ng et al., 2009). Les approches développées pour la gestion de l'approvisionnement peuvent être regroupées en quatre grandes catégories : l'approche juste-à-temps, le stock tampon, les approches proactives et les métaheuristiques.

De nombreuses études montrent que l'utilisation de l'approche juste-à-temps pour résoudre les problèmes de gestion de l'approvisionnement en matériel permet un gain de productivité pouvant aller jusqu'à 10% (Bertelsen et Nielsen, 1995; Pheng et Chuan, 2001; Polat et al., 2007). Cette approche permet aussi, en diminuant les stocks, de réduire l'espace d'entreposage et de niveler l'utilisation des ressources. Néanmoins, le juste-à-temps engendre des coûts importants, notamment au niveau de l'inventaire, du fait de l'incertitude de l'avancement des projets et des prix élevés des achats à court terme (Polat et al., 2007).

Aussi, une alternative consiste à créer un surplus de stock, appelé stock tampon, afin d'éviter les fluctuations d'utilisation du matériel (Ballard et Howell, 1998; Ng et al., 2009). Le problème revient alors à déterminer la taille optimale du stock tampon. Horman et Thomas (2005) ont analysé la relation entre l'inventaire du matériel et la performance des travailleurs en construction et ont déterminé un intervalle de stock tampon favorisant une bonne performance des travailleurs en construction. En dehors de cet intervalle, le stock tampon peut créer des conflits d'espace (Horman et Thomas, 2005).

Des chercheurs se sont penchés sur le développement d'approches proactives pour résoudre les problèmes de gestion de l'approvisionnement. Caron et al. (1998) ont présenté un modèle pour la planification de la livraison des matériaux pour les projets de construction. Plus récemment, Ala-Risku et Kärkkäinen (2006) s'intéressent à l'approche proactive de la gestion de l'approvisionnement et proposent une méthode basée sur le suivi des flux de matériel pour améliorer la gestion de l'inventaire et ainsi mieux prévoir les capacités d'entreposage.

Enfin, Georgy et Basily (2008) proposent un algorithme génétique pour produire des échéanciers admissibles d'approvisionnement en matériel qui sont ensuite intégrés dans l'échéancier de construction.

5. Conclusion

Ce travail a présenté une revue des méthodes de résolution pour les problèmes d'ordonnement de projets avec contraintes de ressources ou de matériel. Le tableau 1 résume les méthodes proposées jusqu'à maintenant. Les méthodes exactes proposées dans la littérature pour le problème RCPS ne permettent pas de résoudre des instances comprenant des centaines d'activités, comme c'est le cas dans la majorité des projets internationaux. Les heuristiques et métaheuristiques paraissent mieux adaptées pour traiter les projets de grande taille. Toutefois, la performance de ces méthodes varie d'un projet à l'autre et peu de tests ont été menés sur des projets de grande taille. De plus, les outils d'ordonnement de projets ne tiennent pas compte des aspects incertains et dynamiques qui caractérisent les projets internationaux. En plus de l'incertitude liée à l'estimation des ressources humaines disponibles et de l'influence de certaines caractéristiques propres à l'emplacement du site principal, les durées des activités varient souvent en fonction des niveaux de compétence et d'expérience des ressources humaines. He et Hu (2007) et Chaiy et al. (2009) ont proposé des modèles incorporant les caractéristiques culturelles et géopolitiques propres aux projets internationaux.

D'autre part, alors même qu'elles tiennent une part importante dans la productivité et la rentabilité des projets (Polat et Arditi, 2005; Tserng et al., 2006), les contraintes logistiques ne sont pas prises en compte dans les modèles actuels. En effet, les travaux en ordonnancement de projets portent principalement sur les contraintes de ressources humaines. Les méthodes de résolution et les outils de planification de projets actuels négligent le traitement des conflits d'utilisation de la capacité de stockage et des contraintes liées aux particularités de la livraison de matériel en contexte international (Guèvremont, 2009). De même, les systèmes d'information et de gestion de projets n'intègrent que rarement les divers processus liés aux contraintes logistiques. Ces systèmes sont développés à l'intention des gestionnaires de production, non des planificateurs, en leur permettant de modifier uniquement les allocations logistiques, sans aucune approche réactive de réordonnement en fonction des contraintes logistiques.

En résumé, ce travail montre la nécessité de développer des modèles d'ordonnement de projets avec traitement simultané des contraintes de matériel et de ressources humaines. À notre connaissance, aucune approche combinant les deux types de contraintes n'a été envisagée à ce jour. Les chercheurs effectuent des simulations en ne tenant compte que d'un seul type de contraintes à la fois. Une piste de recherche intéressante concerne donc le développement d'un outil performant et robuste capable de solutionner, en des temps de calcul raisonnables, des modèles complexes de gestion de projets internationaux admettant l'ensemble des contraintes de ressources humaines et de matériel.

Tableau 1. Méthodes de résolution

Problème	Méthode de résolution	Auteurs		
RCPSP	Méthodes exactes	Séparation et évaluation progressive	Demeulemeester et Herroelen (1997) Brucker et al. (1998) Mingozi et al. (1998) Klein et Scholl (1999) Sprecher (2000) Artigues et Demassey (2005)	
		Hybrides	Cheng et Wu (2006)	
	Heuristiques	Phase I : Sélection des activités pour la planification	Kolisch et Hartmann (1999) Kolisch et Hartmann (2006) Tang et Tang (2008)	
		Phase II : Ordonnement selon des règles heuristiques	Pellerin (1997)	
	Métaheuristiques	Algorithmes génétiques	Valls et al. (2003) Kolisch et Hartmann (2006)	
		Recherche avec tabous	Kolisch et Hartmann (2006)	
		Métaheuristiques hybrides	Debels et Vanhoucke (2005)	
		Systèmes immunitaires artificiels	Agarwal et al. (2007)	
		Optimisation par essaim particulière	Zhang et al. (2005) Tang et Tang (2008)	
		Colonies de fourmis et recherche de points	Chen et al. (2010)	
	Aménagement du site de construction	Métaheuristiques	Algorithmes génétiques	Elbeltagi et al. (2001) Mawdesley et al. (2002) Tam et al. (2002) Zouein et al. (2002) Osman et al. (2003) Jang (2004)
			Colonies de fourmis	Ning et al. (2010)
Gestion des conflits d'espace de stockage	Visualisation statique		Cheng et O'Connor (1996) Jacobus (1997) Riley et Sanvido (1997) Akinci et al. (2002a)	
		Simulation 4D	Guo (2002) Akinci et al. (2002b) Winch et North (2006) Bjornfot et Jongeling (2007) Haque et Rahman (2009)	
	Heuristiques	Méthode améliorative	Zouein et Tommelein (2001)	
	Métaheuristiques	Algorithmes génétiques	Dawood et Sriprasert (2006) Mallasi (2009)	
		Juste-à-temps	Bertelsen et Nielsen (1995) Pheng et Chuan (2001) Polat et al. (2007)	
Gestion de l'approvisionnement en matériel	Stock tampon		Ballard et Howell (1998) Horman et Thomas (2005) Ng et al. (2009)	
		Approches proactives	Caron et al. (1998) Ala-Risku et Kärkkäinen (2006)	
	Métaheuristiques	Algorithmes génétiques	Georgy et Basily (2008)	

6. Remerciements

Cet article a bénéficié du support financier de la Chaire de Recherche Jarislowsky / SNC-Lavalin en Gestion de Projets Internationaux et du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada.

7. Références

Agapiou, A., Clausen, L.E., Flanagan, R., Norman, G., & Notman, D. (1998). The role of logistics in the materials flow control process. *Construction Management and Economics*, 16(2), 131-137.

Agarwal, R., Tiwari, M.K., & Mukherjee, S.K. (2007). Artificial immune system based approach for solving resource constraint project scheduling problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(5-6), 584-593.

Akinci, B., Fischer, M., & Kunz, J. (2002a). Automated generation of work spaces required by construction activities. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(4), 306-315.

Akinci, B., Fischer, M., Levitt, R., & Carlson, R. (2002b). Formalization and automation in time-space conflict analysis. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(2), 124-134.

Ala-Risku, T., & Kärkkäinen, M. (2006). Material delivery problems in construction projects: In possible solution. *International Journal of Production Economics*, 104(1), 19-29.

Artigues, C. & Demasse, S. (2005) Gestion de projet, dans *Gestion de production et ressources humaines : Méthodes de planification dans les systèmes productifs* (Baptiste, P., Giard, V., Hait, A. & Soumis, F.), Chapitre 5, Presses internationales Polytechnique.

Ballard, G., & Howell, G. (1998). Shielding production: Essential step in production control. *Newspaper of Building Engineering and Management*, 124(1), 11-17.

Bertelsen, S. (1995) *Building logistics: A means for improvement of productivity in the building sector*. Copenhagen: Nelleman, Nielsen, & Rauschenberger A/S Consulting Engineers and Planners.

Bjornfot, A., & Jongeling, R. (2007). Application of line-of-balance and 4D CAD for lean planning. *Construction Innovation*, 7(2), 200-11, UK: Emerald.

Blazewicz, J., Lenstra, J.K., & Rinnooy Kan, A.H. G. (1983). Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity. *Discrete Applied Mathematics*, 5(1), 11-24.

Brucker, P., Knust, S., Schoo, A., & Thiele, O. (1998). A branch & bound algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 107(2), 272–288.

Brucker, P., Drexl, A., Möhring, R., Newman, K., & Pesch, E. (1999). Resource constrained project scheduling problem: Notation, classification, models and methods. *European Journal of Operational Research*, 112(1), 3-41.

Caron, F., Marchet, G., & Perego, A. (1998). Project logistics: Integrating the procurement and construction processes. *International Journal of Project Management*, 16(5), 311-319.

Chaïy, S., Ciarlette, D., Cross, B., Manwani, S., Iandoli, L., Shore, B., et al. (2009). Developing a body of knowledge for the management of large-scale international science projects. *PICMET '09 - 2009 Portland International Conference on Management of Engineering & Technology*, 1481-1487.

Chen, W., Shi, Y.J., Teng, H.F., Lan, X.P., & Hu, L.C. (2010). An efficient hybrid algorithm for resource-constrained project scheduling. *Information Sciences*, 180(6), 1031-1039.

Cheng, M.Y., & O'Connor, J.T. (1996). ArcSite: Enhanced GIS for construction site layout. *Journal of Construction Engineering and Management*, 122(4), 329-336.

Cheng, X., & Wu, C. (2006). Hybrid algorithm for complex project scheduling. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 12(4), 585-9.

Dawood, N., & Sriprasert E. (2006). Construction scheduling using multi-constraint and genetic algorithms approach. *Construction Management and Economics*, 24(1), 19-30.

De Reyck, B., & Van de Velde, S. (1999). Informatiesystemen voor projectplanning: Meer communicatie dan optimalisatie. *Business Logistics*, 99(10), 104-110.

Debels D., & Vanhoucke, M. (2005). The electromagnetism meta-heuristic applied to the resource-constrained project scheduling problem. *Artificial Evolution*, pp.259-270, Berlin: Springer.

Deckers, M. (2001). Exploratief onderzoek naar het gebruik van informatiesystemen voor project planning. Eindverhandeling. Department of Applied Economics, K. U. Leuven, Belgium.

Demeulemeester, E.L., & Herroelen, W.S. (1997). New benchmarks results for the resource-constrained project scheduling problem. *Management Science*, 43(11), 1485-1492.

Demeulemeester, E.L., & Herroelen, W.S. (2002). *Project Scheduling : a Research Handbook*. (49), International Series in Operations research and Management Science, Kluwer Academic Publishers.

Dominic, L. (2008). Projet de recherche et développement sur un outil de planification pour une entreprise manufacturière fonctionnant par projets, M.Ing., École Polytechnique de Montréal, Qc., Canada.

Elbeltagi, E., Hegazy, T., Hosny, A.H., & Eldosouky, A. (2001). Schedule-dependent evolution of site layout planning. *Construction Management and Economics*, 19(7), 689-697.

Farmer, J.D., Packard, N.H., & Perelson, A.S. (1986). The immune system, adaptation, and machine learning. *Physica D*, 22D(1-3), 187-204.

Georgy, M., & Basily, S.Y. (2008). Using genetic algorithms in optimizing construction material delivery schedules. *Construction Innovation*, 8(1), 23-45.

Guèvremont, M. (2009). Ordonnancement de projet sous contraintes de ressources, matériels et d'espaces d'entreposage. M.Ing. École Polytechnique de Montréal, Qc., Canada.

Guo S.J. (2002). Identification and resolution of work space conflicts in building construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(4), 287-295.

Haque, M.E., & Rahman, M. (2009). Time-Space-Activity Conflict Detection Using 4D Visualization in Multi-storied Construction Project. *Visual Informatics: Bridging Research and Practice. Proceedings First International Visual Informatics Conference, IVIC 2009*, 266-278.

Hartmann, S. (1999). *Project Scheduling under Limited Resources*, Berlin: Springer.

Hartmann, S., & Briskorn, D. (2010). A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 207(1), 1-14.

He, X., & Hu, W. (2007). An evaluation model for political risks of projects in international context. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 35(11), 1572-7.

Herroelen, W.S. (2005). Project scheduling - Theory and practice. *Production and Operations Management*, 14(4), 413-432.

Horman, M.J., & Thomas, H.R. (2005). Role of inventory buffers in construction labor performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(7), 834-843.

Howell, G., & Ballard, G. (1997). Factors affecting project success in the piping function. *Lean Building*, 161-185, Rotterdam: Balkema.

Jacobus (1997). *PlantSpace Enterprise Navigator: User Guide*. Gaithersburg, MD: Jacobus Technology Inc., <http://www.jacobus.com>.

Jang, H.S. (2004). Genetic algorithm for construction space management. *KSCE J. Civil Eng.*, 8(4), 365-369.

Karan, E.P., & Ardeshir, A. (2008). Safety assessment of construction site layout using geographic information system. *Proceedings of the AEI 2008 Conference - AEI 2008: Building Integration Solutions*, 328.

Kini, D.U. (1999). Materials management: the key to successful project management. *Journal of Management in Engineering*, 15(1), 30-34.

Klein, R., & Scholl, A. (1999). Computing lower bounds by destructive improvement: An application to resource-constrained project scheduling. *European Journal of Operational Research*, 112(2), 322-346.

Kolisch, R. (1999). Resource allocation capabilities of commercial project management software packages. *Interfaces*, 29(4), 19-31.

Kolisch, R., & Hartman, S. (1999). Heuristic algorithms for solving the resource-constrained project scheduling problem: Classification and computational analysis, dans *Handbook on recent Advances in Project Scheduling* (Wergalrz), Ch. 7, Kluwer Academic Publishers.

Kolisch, R., & Hartman, S. (2006). Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: An update. *European Journal of Operational Research*, 174, 23-37.

Koushki, P.A., & Kartam, N. (2004). Impact of construction materials they project time and cost in Kuwait. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 11(2), 126-132.

Laedre, O., Austeng, K., Hougen, T.I., & Klakegg, O.J. (2006). Procurement roads in public building and construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(7), 689-696.

Liberatore, M. J., & Pollack-Johnson, B. (2003). Factors influencing the usage and selection of project management software. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 50(2), 164-174.

Lientz, B.P., & Rea, K.P. (2003). *International Project Management*, Academic Press, San Diego, USA.

Mallasi, Z. (2009). Towards minimizing space-time conflicts between site activities using simple genetic algorithm the best execution strategy. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 14, 154-79.

Mawdesley, M.J., Al-jibouri, S.H., & Yang, H. (2002). Genetic algorithms for construction site layout in project planning. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(5), 418-426.

Mingozi, A., Maniezzo, V., Ricciardelli, S., & Bianco, L. (1998). An exact algorithm for the multiple resource-constrained project scheduling problem based on a new mathematical formulation. *Management Science*, 44, 714-729.

Ng, S.T., Shi, J., & Fang, Y. (2009). Enhancing the logistics of construction materials through activity-based simulation approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 16(3), 224-37.

Ning, X., Lam, K.C., & Lam, M.C.K. (2010). Dynamic construction site layout planning using max-min ant system. *Automation in Construction*, 19(1), 55-65.

Osman, H.M., Georgy, M.E., & Ibrahim, M.E. (2003). A hybrid CAD-based construction site layout planning system using genetic algorithms. *Automation in Construction*, 12(6), 749-764.

Pellerin, R. (1997). Modèle d'ordonnement dynamique de projets de réfection. Ph.D. École Polytechnique de Montréal, Qc., Canada.

Persona, A., Regattieri, A., & Romano, P. (2004). An integrated reference model for production planning and control in SMEs. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 15(7), 626-640.

Pheng, L.S., & Chuan, C.J. (2001). Just-in-time management of precast concrete components. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(6), 494-501.

Polat, G., & Arditi, D. (2005). The JIT materials management system in developing countries. *Construction Management and Economics*, 23(7), 697-712.

Polat, G., Arditi, D., & Mungen, U. (2007). Simulation-based decision support system for economical supply chain management of rebar. *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(1), 29-39.

Pritsker, A., Watters, L., & Wolfe, P. (1969). Multi-project scheduling with limited resources: a zero-one programming approach. *Management Science*, 16, 93-108.

Retik, A., & Shapira, A. (1999). VR-based planning of construction site activities. *Automation in Construction*, 8(6), 671-680.

Riley, D.R., & Sanvido, V.E. (1997). Space planning method for multistory building construction. *Journal of Building Engineering and Management*, 123(2), 171-180.

Sprecher, A. (2000). Scheduling resource-constrained projects competitively at modest resource requirements. *Management Science*, 46(5), 710-723.

Tam, C.M., Tong, T.K.L., Leung, A.W.T., & Chiu, G.W.C. (2002). Site layout planning using nonstructural fuzzy decision support system. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(3), 220-231.

Tang, Q., & Tang, L. (2008). Heuristic particle swarm optimization for resource-constrained project scheduling problem in chemical industries. *Chinese Control and Decision Conference, 2008, CCDC 2008*, 1475-1480.

Tommelein, I.D., Levitt, R.E., Hayes-Roth, B., & Confrey, T. (1992). SightPlan experiments: Alternative strategies for site layout design. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 5(1), 42-63.

Trautmann, N., & Baumann, P. (2009). Resource-allocation capabilities of commercial project management software: An experimental analysis. *2009 International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE 2009*, 1143-1148.

Tserng, H.P., Yin, S.Y.L., & Li, S. (2006). Developing a resource supply chain planning system for construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(4), 393-407.

Valls, V., Ballestin, F., & Quintanilla, A. (2003). A hybrid genetic algorithm for the RCPSP, Rapport technique, Département de statistiques et recherche opérationnelle, Université de Valence, Espagne.

Winch, G.W., & North, S. (2006). Critical space analysis. *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(5), 473-481.

Yourdon, E. (2003). *Death March, 2nd ed.* New Jersey: Prentice Hall, Inc.

Zhang, H., Li, X., Li, H., & Huang, F. (2005). Particle swarm optimization-based schemes for resource-constrained project scheduling. *Automation in Construction*, 14(3), 393-404.

Zouein, P.P., Harmanani, H., & Hajar, A. (2002). Genetic algorithm for solving site layout problem with unequal-size and constrained facilities. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(2), 143-152.

Zouein, P.P., & Tommelein, I.D. (2001). Improvement algorithm for limited space scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(2), 116-124.