



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 méthode heuristique pour l'ordonnancement de projets avec contraintes de ressources et chevauchement d'activités

Lucas Grèze
Robert Pellerin
Patrice Leclaire
Nathalie Perrier

Mai 2012

CIRRELT-2012-18

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 méthode heuristique pour l'ordonnancement de projets avec contraintes de ressources et chevauchement d'activités

Lucas Grèze¹, Robert Pellerin^{1,2,*}, Patrice Leclaire³, Nathalie Perrier¹

¹ Département de mathématiques et de génie industriel, École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, succursale Centre-ville, Montréal, Canada H3C 3A7

² Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport (CIRRELT)

³ Institut Supérieur de Mécanique de Paris (Supméca), 3 rue Fernand Hainaut, 93407 Saint-Ouen, Cedex France

Résumé. Le chevauchement d'activités est une pratique courante pour accélérer l'exécution de projets d'ingénierie. Cette technique consiste à exécuter en parallèle deux activités, normalement exécutées de manière séquentielle, en autorisant l'activité en aval à débiter avant la fin de l'activité en amont à partir d'informations préliminaires. L'accélération de projets à l'aide du chevauchement d'activités permet de réduire la durée d'exécution d'un projet, mais peut entraîner des tâches de retouches suite à la réception d'informations complémentaires transmises après le démarrage de l'activité en aval. Dans la littérature, les études sur le chevauchement tiennent compte des interactions entre les activités et des retouches qu'elles peuvent engendrer, mais le chevauchement est rarement intégré au problème d'ordonnancement de projets. De plus, les études sur les techniques d'accélération de projets ne considèrent que rarement les contraintes liées à la limitation des ressources disponibles. Dans cet article, nous proposons une méthode heuristique pour l'ordonnancement de projets. La méthode s'inspire des méthodes de compression d'activités. En plus d'intégrer le chevauchement d'activités comme technique d'accélération de projets, la méthode permet de générer un échancier respectant les contraintes liées à la limitation des ressources disponibles. Des tests effectués sur des instances générées aléatoirement montrent que la méthode permet, dans certains cas, de produire de bonnes solutions en des temps de calcul raisonnables.

Mots clés. Chevauchement d'activité, ingénierie simultanée, gestion de projets, ordonnancement de projets.

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

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.

* Auteur correspondant: Robert.Pellerin@cirrelt.ca

1. Introduction

Le problème d'ordonnancement de projets avec contraintes de ressources (en anglais, RCPSP, *Resource Constrained Project Scheduling Problems*) a été abondamment étudié (Brucker et al. 1999; Hartmann et Briskorn 2010). Introduit par Pritsker (1969), le RCPSP consiste à ordonnancer un ensemble d'activités liées par des relations de précédences dans le but de minimiser la durée du projet sous des contraintes de précedence et d'utilisation de ressources. Le RCPSP est NP-difficile au sens fort (Blazewicz et al. 1983). Afin de pouvoir malgré tout traiter ce problème, des méthodes heuristiques ont été proposées (Neumann et Zhan 1995; Pellerin 1997; Hartmann 1999; Shue et Zamani 1999; Herroelen 2005; Kolisch et Hartmann 2006).

Depuis plus de dix ans, différentes techniques d'accélération ont été développées dans le but de réduire la durée d'exécution de projets. Ces techniques incluent le chevauchement, la compression et la substitution d'activités (Gerk et Quassim 2008) et peuvent être utilisées soit pour produire un échancier initial, soit pour le modifier en cours d'exécution. Dans la pratique, le chevauchement d'activités constitue une technique très répandue pour accélérer les projets d'ingénierie (Bogus et al. 2005). Cette technique consiste à exécuter en parallèle deux activités normalement séquentielles en autorisant l'activité en aval à débiter avant la fin de l'activité en amont avec des informations préliminaires (Figure 1). Toutefois, le chevauchement d'activités peut entraîner des tâches de retouches et des modifications suite à la réception d'informations complémentaires transmises après le démarrage de l'activité en aval (Roemer et al. 2000). Le chevauchement permet donc de réduire le temps total d'exécution d'un projet au prix d'une charge de travail et d'un coût d'exécution supplémentaires associés aux retouches.

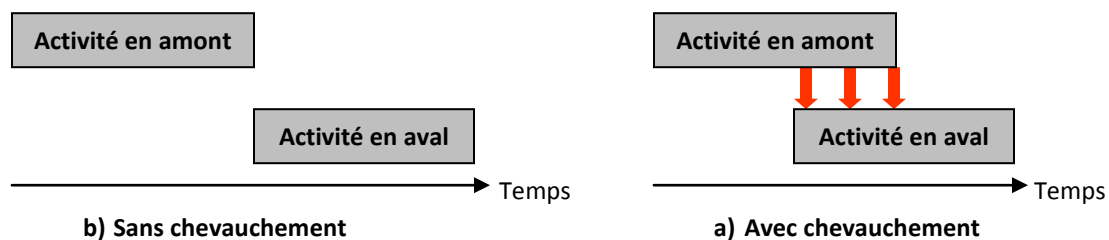


Figure 1. Activité en amont et activité en aval

Les modèles de chevauchement proposés dans la littérature peuvent être classés en deux grandes catégories. La première catégorie regroupe les modèles spécifiques à un couple d'activités : une activité en amont dont dépend la réalisation de l'activité en aval. Krishnan et al. (1997) développent un modèle de planification pour trouver le meilleur compromis entre chevauchement et retouches à l'aide de deux concepts : l'évolution (lente ou rapide) de l'activité en amont, qui reflète le niveau d'information pouvant être transmis à l'activité en aval, et la sensibilité (faible ou élevée) de l'activité en aval, qui correspond au temps de travail nécessaire pour pallier à un changement de l'activité en amont. À partir de ces concepts, Krishnan et al. (1997) définissent quatre grandes stratégies de chevauchement, chacune s'adaptant à un cas de figure évolution/sensibilité. Par exemple, lorsque la sensibilité au changement est faible et la vitesse d'évolution rapide, Krishnan et al. (1997) suggèrent d'appliquer le chevauchement distributif qui consiste à débiter l'activité en aval avec des informations préliminaires, puis à intégrer rapidement les informations finales. Terwiesch et Loch (1999) démontrent de manière statistique l'influence de la vitesse d'évolution de l'activité en amont sur le gain effectif du chevauchement. Bogus et al. (2005) améliorent le modèle de Krishnan et al. (1997) et identifient huit stratégies de chevauchement, de même que les facteurs influençant l'évolution et la sensibilité des activités. Dans la définition de l'évolution de l'activité en amont, certains auteurs considèrent que les efforts de communication et de coordination sont « gratuits » et instantanés (Krishnan et al. 1997; Roemer et al. 2000). Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de planifier et d'organiser les échanges d'information entre les activités (e.g., plans, données de dimensionnement, commandes de matériel). D'autres, au contraire, considèrent que la communication implique un coût et un temps d'exécution (Loch et Terwiesch 1998; Lin et al. 2009).

Contrairement à la première catégorie de modèles axés sur les interactions entre deux activités, ce qui limite leur application à des projets de petite taille, la seconde catégorie regroupe les modèles plus globaux, adaptés à des projets industriels. Ces modèles, qui peuvent être regroupés en deux grandes classes, considèrent, non pas un couple d'activités, mais plutôt un projet dans sa globalité. La première classe comprend les modèles d'optimisation déterministes où la relation entre la durée du chevauchement et la durée des retouches nécessaires est connue préalablement pour les activités

chevauchables (Roemer et al. 2000; Lin et al. 2009). La plupart de ces modèles utilisent des matrices de décomposition (en anglais, Design Structure Matrix, DSM), introduites par Steward (1981), pour représenter les dépendances entre les activités, limiter les rétroactions et identifier les opportunités de chevauchement d'activités (Maheswari et Varghese 2005). Roemer et al. (2000) développent une méthode heuristique afin de trouver un compromis entre la durée d'exécution d'un projet et son coût. Liberatore et Pollack-Johnson (2006) proposent un modèle de programmation quadratique mixte en nombres entiers pour la compression et le chevauchement d'activités, sans toutefois tenir compte des contraintes de ressources. De même, Gerik et Qassim (2008) proposent un modèle d'accélération de projets à l'aide de la compression, du chevauchement et de la substitution d'activités. Ces trois techniques d'accélération sont combinées afin de trouver un échéancier à coût minimal. Le problème est formulé comme un programme linéaire en nombres entiers. Thiagarasu et Devi (2009) proposent une heuristique pour réduire la durée d'un projet à l'aide du chevauchement d'activités. La seconde classe de modèles comprend les modèles de simulation. Ces modèles sont utilisés lorsqu'il n'est pas possible d'estimer la durée des retouches requises suite au chevauchement d'activités. Par exemple, Cho et Eppinger (2005) ont développé un modèle de simulation avec des durées stochastiques des activités et des chevauchements, et des contraintes de ressources. Le modèle prend aussi en compte les retouches et les itérations (i.e. les interactions entre plusieurs activités nécessitant des retouches dues à des retours d'information issus des activités en aval). Les auteurs ont montré que les contraintes de ressources peuvent retarder le chevauchement de certaines activités et donc, la date de fin du projet. Wang et Lin (2009) ont développé un modèle de chevauchement stochastique pour prendre en compte les risques lors de l'ordonnancement. Le modèle considère les itérations et les probabilités de retouches. Cependant, le modèle ne prend pas en compte les contraintes de ressources.

Le Tableau 1 résume les caractéristiques des modèles de chevauchement. Les recherches dans le domaine de la planification de projets ignorent en grande partie les contraintes liées au contexte du chevauchement d'activités. En effet, les études sur les techniques d'accélération de projets ne considèrent que rarement les contraintes liées à la limitation des ressources disponibles. Or la gestion des ressources a un impact crucial sur

le déroulement des projets. De plus, dans les modèles étudiés, les possibilités de chevauchement se limitent souvent aux valeurs d'un intervalle. Cependant, les configurations de chevauchement ne sont pas toutes acceptables en pratique. En fait, chaque configuration de chevauchement doit correspondre à un mode d'exécution précis du couple d'activités, auquel est associé un échange d'informations.

Tableau 1. Caractéristiques des modèles de chevauchement

Modèles de chevauchement		Auteurs	Caractéristiques des modèles	
Couplage de deux activités		Krishnan et al. (1997)	- Compromis entre chevauchements et retouches - Aucun effort de communication	
		Loch et Terwiesch (1998)	- Coût et délai de communication	
		Terwiesch et Loch (1999)	- Mesure statistique de l'efficacité du chevauchement	
		Bogus et al. (2005)	- Stratégies de chevauchement	
Application à des projets industriels	Modèles déterministes	Heuristiques	Roemer et al. (2000)	- Aucun effort de communication - Compromis entre durée et coût du projet
			Thiagarasu et Devi (2009)	- Contraintes de ressources
		Méthodes exactes	Liberatore et Pollack-Johnson (2006)	- Programme quadratique mixte en nombres entiers
			Gerk et Qassim (2008)	- Programme linéaire en nombres entiers - Min coût de l'échéancier
	Modèles de simulation		Lin et al. (2009)	- Coût et délai de communication
			Cho et Eppinger (2005)	- Durées stochastiques des activités et des chevauchements - Contraintes de ressources - Retouches et itérations
			Wang et Lin (2009)	- Modèle stochastique - Itérations - Probabilités de retouches

Récemment, Grèze et al. (2011) ont montré que la sévérité des contraintes de ressources, la proportion de couples d'activités chevauchables et le pourcentage maximum de chevauchement ont un impact significatif sur l'efficacité du chevauchement comme technique d'accélération de projet. De plus, Berthaut et al. (2011) formulent le problème d'ordonnancement de projets avec contraintes de ressources et chevauchement d'activités comme un programme linéaire en variables binaires. Dans un article subséquent, Berthaut et al. (2012) abordent le problème du compromis entre la durée et le

coût d'un projet dans le cas où les délais de communication et de coordination sont non négligeables. Toutefois, aucune méthode de résolution n'est proposée.

L'objectif de cet article est de proposer une méthode d'ordonnancement de projets qui intègre le chevauchement d'activités comme technique d'accélération de projets. La méthode permet de générer un échancier tenant compte des contraintes de ressources et des possibilités de chevauchement. Pour évaluer l'efficacité de cette méthode, un processus de génération des données permettant de générer différentes configurations de chevauchement acceptables est proposé.

L'article est organisé comme suit. La section 2 décrit le problème d'ordonnancement de projets avec contraintes de ressources et chevauchement d'activités. La section 3 présente une méthode heuristique permettant de résoudre le problème. Une extension de la méthode, permettant d'étudier le compromis entre accélération et augmentation du coût d'un projet, est également présentée à la section 3. La section 4 présente les cas d'études générés et les résultats. La conclusion est présentée à la dernière section.

2. Ordonnancement de projets avec contraintes de ressources et chevauchement d'activités

Le problème d'ordonnancement de projets avec contraintes de ressources et modes de chevauchement (en anglais, RCPS-OM, *Resource Constrained Project Scheduling Problem with Overlapping Modes*) est une extension du problème d'ordonnancement classique (RCPS). Étant donné un ensemble d'activités à réaliser, le RCPS-OM 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 relations de précédence, les contraintes en ressources humaines et les possibilités de chevauchement. Dans cet article, l'ordonnancement de projets avec contraintes de ressources et chevauchement d'activités s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- (1) les activités chevauchables sont identifiées a priori;
- (2) les échanges d'information sont unidirectionnels;
- (3) les échanges d'information entre les activités chevauchables sont gratuits et instantanés;

(4) pour chaque couple d'activités, les possibilités de chevauchement sont définies par des modes (de manière discrète);

(5) pour chaque mode de chevauchement, la durée des retouches est estimée a priori.

La Figure 2 illustre les différentes étapes menant à l'ordonnancement et à l'accélération de projets à l'aide du chevauchement d'activités.

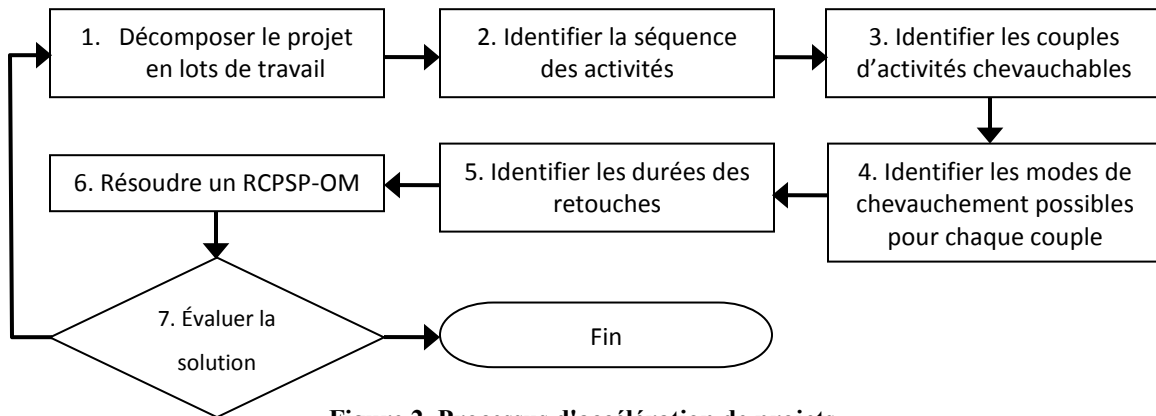


Figure 2. Processus d'accélération de projets

À l'étape 1, le projet est décomposé en lots de travail. La taille des lots dépend du niveau de détail requis afin de bien gérer le projet. Les lots de travail doivent regrouper des activités de complexité et de durée semblables, car les possibilités de chevauchement seront établies à partir de ces activités. Décomposer un projet en de nombreuses activités de courte durée exige un effort de gestion et de contrôle lors de l'exécution, mais augmente les chances de détecter, parmi les couples d'activités, des opportunités de chevauchements lors de la planification.

Dans les méthodes de planification de projets, les projets sont souvent décrits sous forme de réseaux, les nœuds représentant soit les activités (réseau potentiel-tâches), soit les relations entre les activités (réseau potentiel-étapes). Bien que ces réseaux décrivent la séquence d'exécution des activités (étape 2), ils ne permettent pas de représenter les interactions entre les activités ou de modéliser les flux d'information entre les activités. Or, l'étude des interactions entre les activités est importante afin d'identifier les activités chevauchables. Ces relations supplémentaires entre les activités peuvent toutefois être modélisées à l'aide des matrices de décomposition DSM (Browning 2001). En effet, les DSM visent à représenter les flux d'information entre les différentes activités, permettant

ainsi de repérer les retours d'information. Ces retours, issus des changements impliqués par l'activité en aval, engendrent des modifications et du travail supplémentaire au niveau de l'activité en amont. Afin d'éviter les retours en arrière et ainsi obtenir une séquence d'exécution des activités où les relations de précédence et les flux d'information sont orientés dans le même sens, les DSM sont triangularisées. Les activités peuvent aussi être agrégées ou décomposées afin d'éliminer les retours en arrière. Dans la suite de l'article, on suppose que des études préliminaires ont été menées de manière à identifier les relations entre les activités et éliminer les retours en arrière. Les projets considérés sont donc composés uniquement d'activités dépendantes et indépendantes et le flux d'information (entre les activités dépendantes) est unidirectionnel.

La troisième étape du processus consiste à identifier les couples d'activités chevauchables. L'étude des échanges d'information entre les activités à l'aide des DSM et des données historiques permet de diviser les couples d'activités en deux catégories : les couples chevauchables et les couples non chevauchables. Deux activités sont chevauchables lorsque l'activité en aval peut débiter, avec des informations préliminaires, avant que l'activité en amont ne se termine tout en recevant, durant son exécution, les informations finales de l'activité en amont. Pour les couples d'activités dont la sensibilité est élevée, les changements d'information transmis par l'activité en amont impliquent de nombreuses retouches sur l'activité en aval. Le gain associé est donc minime (Krishnan 1996). Par conséquent, les chevauchements sont permis lorsque la sensibilité est faible.

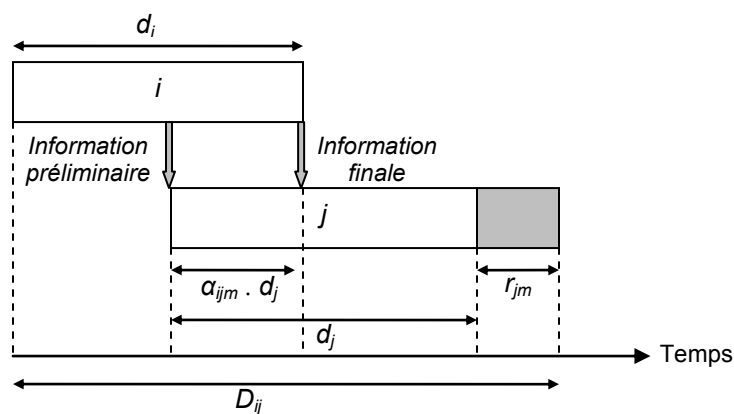


Figure 3. Processus de chevauchement des activités i et j pour le mode m

Aux étapes 4 et 5, les modes de chevauchement possibles pour chaque couple d'activités et les durées de retouches associées sont identifiés. La figure 3 représente le processus de chevauchement entre deux activités chevauchables i et j . Ici, l'activité en aval j débute avec des informations préliminaires transmises par l'activité en amont i . Le taux de chevauchement associé au mode de chevauchement m , noté α_{ijm} , correspond à une fraction entière de la durée de l'activité j , notée d_j . Ainsi, on considère $\alpha_{ijm} \cdot d_j$ comme un nombre entier. La durée des retouches associées au mode m pour l'activité j , r_{jm} , est ajoutée afin de tenir compte de la mise à jour des informations transmises lors de la réalisation de l'activité j . Le temps total d'exécution des activités i et j pour le mode de chevauchement m est défini comme suit : $D_{ijm} = d_i + d_j(1 - \alpha_{ijm}) + r_{jm}$.

En pratique, l'ordonnancement d'un projet est établi sur la base de périodes discrètes (heures, jours, semaines, etc.). Les pourcentages de chevauchement et les retouches associées aux modes sont donc définis de manière discrète. De plus, l'avancement des activités est mesuré à partir de la réalisation de jalons qui correspondent à des avancements majeurs ou à la réalisation de biens livrables (spécifications, plans, commandes de matière première, etc.) définis lors de la phase initiale du projet. Les informations préliminaires nécessaires au démarrage de l'activité en aval sont issues de la réalisation de ces jalons. Chaque mode de chevauchement est ainsi caractérisé par un pourcentage de chevauchement correspondant à une transmission d'information par l'activité en amont, et une quantité de retouches à effectuer sur l'activité en aval. D'une part, les valeurs de α_{ijm} sont déterminées en lien avec la livraison des biens majeurs de l'activité i de façon à s'assurer que les informations préliminaires utilisées sont approuvées. D'autre part, la définition des modes de chevauchement par rapport aux jalons permet de recourir facilement aux données historiques pour estimer les temps de retouches causés par le chevauchement d'activités. Le problème de la détermination du temps des retouches par rapport au temps de chevauchement est traité dans la littérature (Krishnan et al. 1997; Lin et al. 2009).

La figure 4 illustre quatre modes de chevauchement possibles pour deux activités. Les activités chevauchables peuvent être exécutées sans chevauchement ($m = 1$) ou en régime accéléré ($m > 1$). Dans cet article, on suppose qu'il n'y a pas de restriction concernant le nombre de prédécesseurs chevauchables pour une activité. Si une activité compte

plusieurs prédécesseurs, alors le mode associé correspond à une combinaison des différentes relations de précedence. Dans ce cas, les retouches totales à effectuer correspondent à la somme des retouches associées aux modes de précedence (modes de chevauchement).

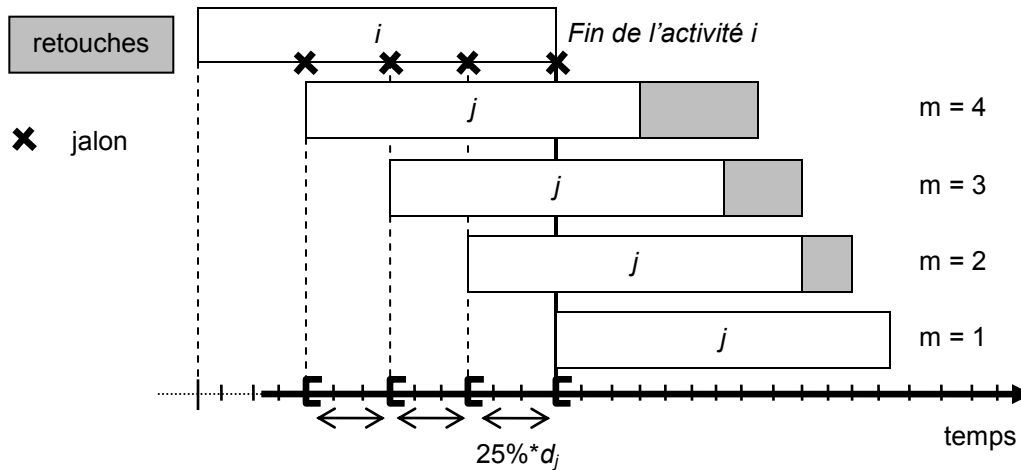


Figure 4. Différents modes d'exécution possibles pour le couple d'activités (i, j)

Suite à l'évaluation des paramètres de chevauchement, l'ordonnancement du projet est entrepris (étape 6). À la section 3, nous présentons une méthode heuristique pour l'ordonnancement de projets avec contraintes de ressources et chevauchement d'activités. Une fois l'ordonnancement terminé, l'échéancier obtenu est comparé avec l'échéancier initial, en termes de coût et de durée d'exécution (étape 7). Si la durée d'exécution du projet et le coût associé sont acceptables, alors le processus s'arrête. Sinon, celui-ci est repris à l'étape initiale en décomposant plus finement les activités pour détecter de nouvelles opportunités de chevauchement, de façon à obtenir un échéancier plus compressé.

3. Heuristique pour l'ordonnancement de projets avec chevauchement d'activités

Cette section présente une méthode heuristique pour l'ordonnancement de projets avec contraintes de ressources et possibilités de chevauchement. La méthode proposée

correspond à l'étape 6 du processus d'accélération de projets présenté à la Figure 2 (Section 2). Une extension de la méthode est également proposée afin de considérer le coût associé au chevauchement d'activités.

3.1 Méthode heuristique

La Figure 5 présente la méthode heuristique pour l'accélération de projets à l'aide du chevauchement d'activités.

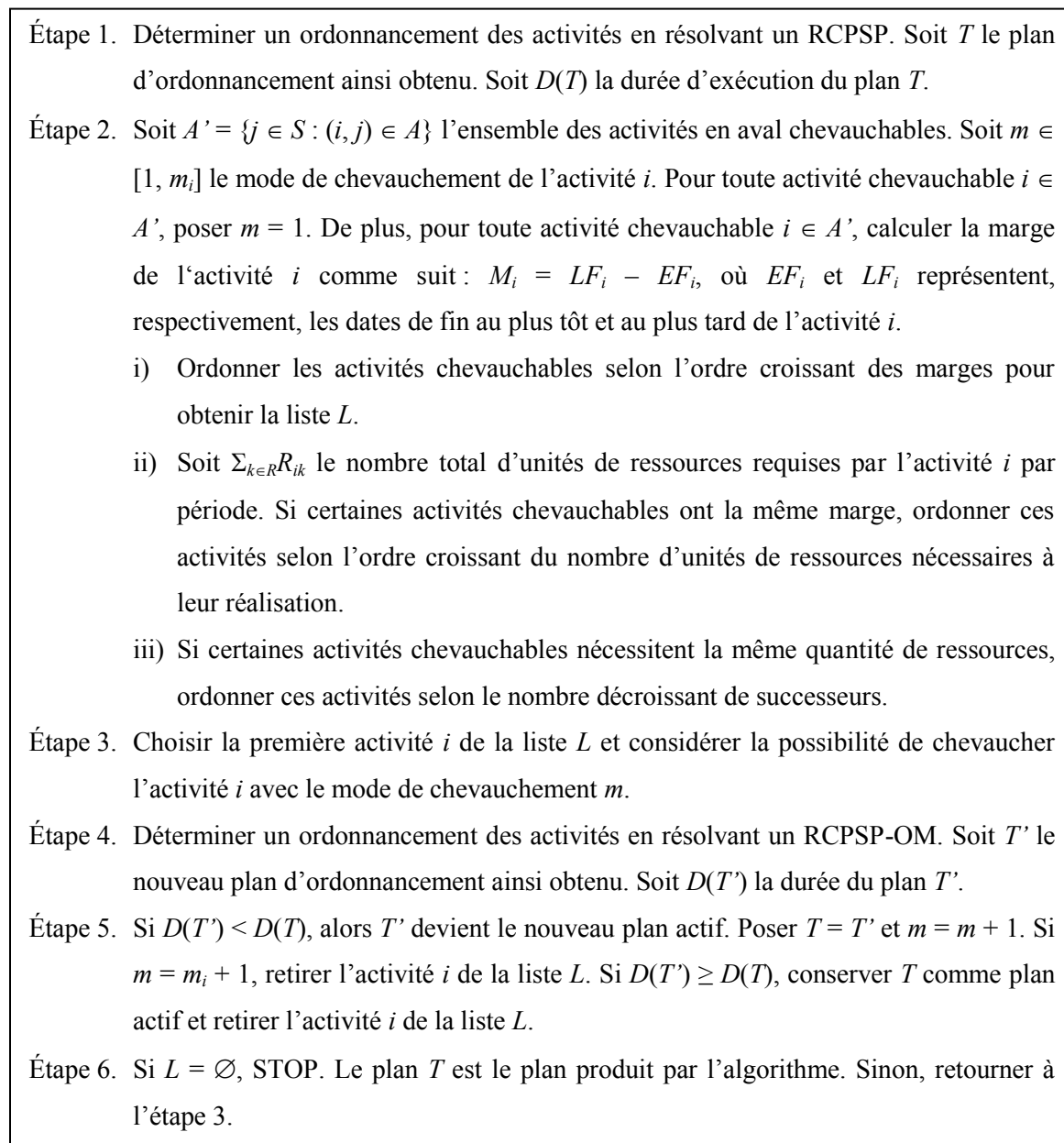


Figure 5. Heuristique pour l'accélération de projets à l'aide du chevauchement d'activités

Cette méthode est inspirée des méthodes de compression d'activités (Gray et al. 2007). La méthode suppose que les retouches liées au chevauchement sont ajoutées aux activités en aval et que la consommation des ressources est constante tout au long de l'exécution du projet (incluant les retouches). La méthode considère également que les modes de chevauchement possibles pour chaque couple d'activités et la durée des retouches associées à chaque mode sont préalablement connus.

La méthode débute par la résolution d'un RCPSA à l'aide du progiciel de gestion de projets MS Project 2007 afin d'obtenir un plan initial. Les activités sont ensuite chevauchées de manière incrémentale selon un ordre de priorité. Pour chaque activité chevauchable, le nouveau plan T' ainsi obtenu est comparé au plan actif T . Si la durée d'exécution du nouveau plan est inférieure à la durée du plan actif, le nouveau plan devient alors le plan actif. Sinon, l'activité chevauchable est retirée de la liste. L'algorithme prend fin après avoir considéré toutes les possibilités de chevauchement.

À l'étape 2 de l'algorithme, les activités chevauchables sont ordonnées selon trois règles de priorité. Les activités chevauchables sont d'abord classées selon l'ordre croissant de leur marge. La marge M_i d'une activité i est la différence entre la date de fin au plus tard LF_i et la date de fin au plus tôt EF_i de l'activité. Ces dates sont déterminées a priori à l'aide d'un algorithme de passe avant et passe arrière qui tient compte de la date de démarrage du projet (temps 0) et de la durée maximale du projet (temps T , i.e. la somme des durées d'exécution de toutes les activités), tout en ignorant les contraintes de ressources. Les activités chevauchables de marge égale sont ensuite ordonnées selon l'ordre croissant du nombre d'unités de ressources nécessaires à leur réalisation. En effet, les activités qui mobilisent peu de ressources ont moins d'impact sur les contraintes de ressources. Enfin, les activités chevauchables nécessitant la même quantité de ressources sont ordonnées selon l'ordre décroissant du nombre de successeurs. La liste ordonnée des activités chevauchables est mise à jour à chaque itération. L'algorithme est codé sous la forme d'une macro Visual Basic liant Excel et MS Project 2007.

3.2 Compromis entre accélération et augmentation du coût d'un projet

La fonction-objectif utilisée à l'étape 5 de l'algorithme (Figure 5) correspond à la durée du projet. Or, en pratique, l'accélération à l'aide du chevauchement d'activités peut

apparaître, à partir d'un certain seuil, inefficace à cause des coûts de retouches importants qu'elle engendre. Aussi, dans cette section, nous proposons de considérer le compromis entre la diminution de la durée d'un projet à l'aide du chevauchement d'activités et l'augmentation du coût entraîné par les retouches en adaptant la fonction-objectif de l'algorithme.

La recherche du meilleur compromis entre accélération et augmentation du coût d'un projet revient à maximiser les gains associés à l'exécution d'un projet. La nouvelle fonction d'évaluation correspond ainsi aux gains associés au passage du plan actif T au nouveau plan T' et s'énonce comme suit :

$$G = \alpha * [D(T) - D(T')] + C(T) - C(T') \quad (1)$$

où α est le coût d'opportunité correspondant aux primes (pénalités) associées à une clôture en avance (en retard) d'un projet. $C(T)$ et $C(T')$ représentent les coûts des retouches associées, respectivement, à l'exécution des plans T et T' . La fonction d'évaluation (1) détermine le gain associé à la diminution de la durée d'exécution d'un projet duquel on retranche les coûts associés aux retouches engendrées par la stratégie de chevauchement d'activités. Si $G > 0$, alors le plan T' devient le plan actif. Sinon, le plan T est conservé.

4. Expérimentation numérique

4.1 Données expérimentales

La Figure 6 illustre le processus de génération des instances aléatoires. Ce processus correspond aux étapes 3, 4 et 5 du processus d'accélération de projets présentée à la Figure 2 (Section 2). La Figure 6 indique, à chaque étape du processus, les ensembles et les paramètres d'entrée et de sortie.

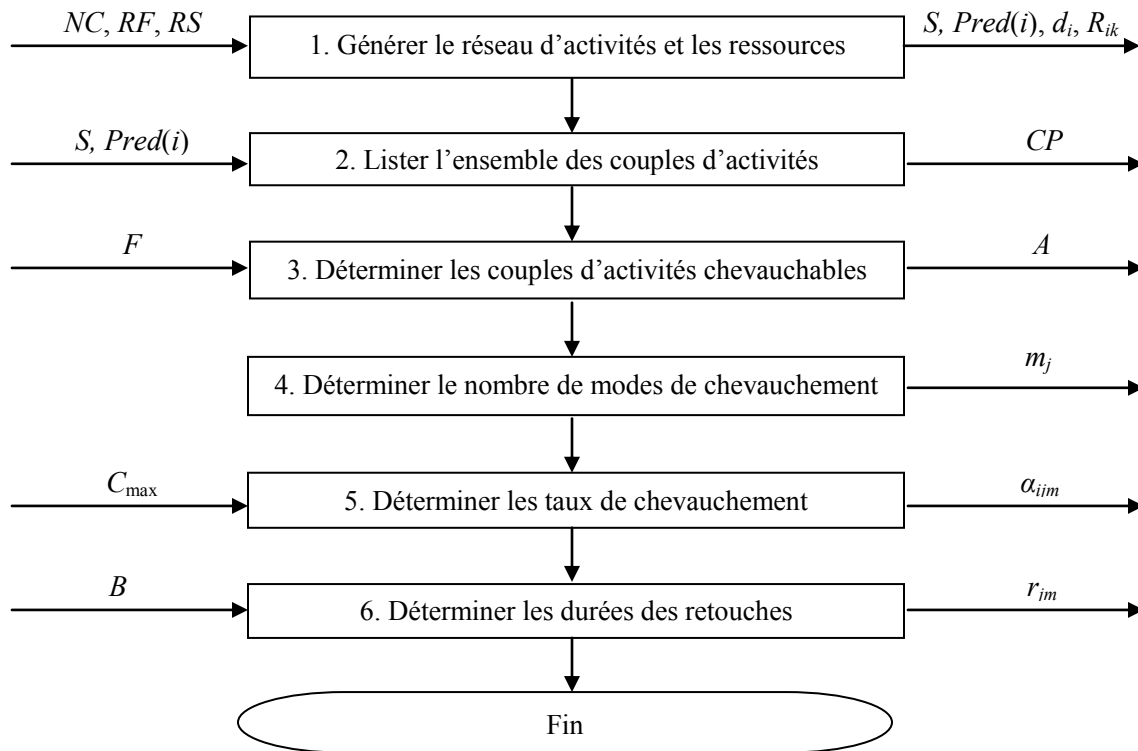


Figure 6. Processus de génération des données

Le générateur de projets PROGEN, développé par Kolisch et Sprecher (1997), est utilisé pour générer trois réseaux comprenant chacun 30 activités. Quatre types de ressources sont définis, chaque type représentant une compétence distincte. En premier lieu, le réseau d'activités (S), les relations de précédence ($Pred(i)$), les durées des activités (d_i) et les ressources nécessaires (R_{ik}) sont générées. Les paramètres définis par défaut sont conservés, sauf pour NC , RF et RS . Le paramètre NC (en anglais, *Network Complexity*) représente le nombre moyen de relations entre les activités. Dans la bibliothèque de projets développée par Kolisch et Sprecher (1997), NC varie entre 1.5 et 2.1. Le paramètre RF (en anglais, *Resource Factor*) dénote, en pourcentage, le nombre moyen de compétences nécessaires pour exécuter une activité. $RF = 1$ lorsque les quatre compétences sont nécessaires pour l'exécution de chaque activité. $RF = 0.5$ lorsque, en moyenne, chaque activité utilise deux compétences distinctes pour sa réalisation. Pour les tests, nous posons $NC = 1.8$ et $RF = 0.5$. Le paramètre RS (en anglais, *Resource Strength*) définit la sévérité des contraintes de ressources (Kolisch et Sprecher 1997). Pour chaque

projet, trois degrés de sévérité des contraintes de ressources sont considérés : contraintes sévères de ressources ($RS = 0.5$), contraintes moyennes ($RS = 0.75$) et absence de contraintes de ressources lorsque le projet est exécuté sans chevauchement ($RS = 1$). Dans ce dernier cas, les ressources disponibles sont égales à la demande de ressources lors de l'exécution du projet sans chevauchement. Pour chaque compétence k , le nombre de ressources disponibles est défini par l'équation suivante :

$$R_k = Q_{k,\min} + Round(RS * (Q_{k,\max} - Q_{k,\min})) \quad (2)$$

où $Q_{k,\min}$ est égal à la demande maximale parmi les activités pour la ressource k et $Q_{k,\max}$ est égal à la demande maximale observée pour la ressource k lorsque le projet est exécuté sans considérer les contraintes de ressources. Le paramètre RS est le paramètre ayant le plus d'influence sur le temps de calcul nécessaire pour résoudre le RCPSP. Plus RS est petit, plus le problème est complexe. Kolisch et al. (1995) ont montré que lorsque RS passe de 1 à 0.2, les temps de calcul augmentent d'un facteur 1000.

Une fois le réseau d'activités et les ressources requises générés, les paramètres nécessaires à la prise en compte des opportunités de chevauchement sont définis : l'ensemble des couples d'activités chevauchables (A), le nombre de modes de chevauchement pour chaque activité (m_j), le taux de chevauchement pour chaque couple et chaque mode (α_{ijm}) et, pour chaque activité, la durée des retouches associée à chaque mode (r_{jm}). Les possibilités de chevauchement sont déterminées de façon aléatoire à partir de trois facteurs : F , C_{\max} et B . Le paramètre F dénote le pourcentage des couples d'activités chevauchables parmi l'ensemble des couples d'activités CP . Ce paramètre reflète les résultats de l'analyse des relations et des flux d'information entre les activités qui a permis d'identifier les opportunités de chevauchement. Le paramètre C_{\max} représente le pourcentage maximum de chevauchement pour un couple d'activités. Enfin, B dénote le pourcentage de retouches nécessaires suite au chevauchement. On suppose que la relation entre la durée du chevauchement et la durée des retouches est linéaire. Pour les tests, nous posons $F = 40\%$, $C_{\max} = 75\%$ et $B = 40\%$. La valeur de B correspond à la valeur médiane des valeurs utilisées dans la littérature. Le choix des valeurs de F et C_{\max} est basé sur l'étude de Grèze et al. (2011). Les couples d'activités chevauchables

sont déterminés aléatoirement à l'aide du paramètre $F : card(CP)*F = card(A)$. Pour les activités non chevauchables, un seul mode est réalisable ($m = 1$, Figure 4). Les taux de chevauchement des activités non chevauchables et les quantités de retouches associées sont nuls. Pour chaque couple d'activités chevauchables, quatre modes de précedence sont générés (Figure 4), correspondant à des fractions de 0%, 25%, 50% et 75% de la durée d'exécution de l'activité en aval. Ce découpage est arbitraire. Dans la pratique, les modes de précédences doivent correspondre aux différents jalons délivrés par l'activité en amont (voir Section 2). Ainsi, pour chaque couple d'activités chevauchables, les pourcentages de chevauchement et les durées des retouches associés aux modes peuvent être déterminés, respectivement, par les équations (3) et (4):

$$\alpha_{ijm} = round\left(\frac{C_{\max} * (m-1)}{3} * d_i\right) \quad \forall (i, j) \in A, \forall m \in [1, m_j] \quad (3)$$

$$r_{jm} = \sum_{i \in Pred(j)} round(B * \alpha_{ijm} * d_i) \quad \forall j \in S : (i, j) \in A, \forall m \in [1, m_j] \quad (4)$$

Rappelons que lorsqu'une activité chevauche plusieurs prédécesseurs, la durée totale des retouches est alors égale à la somme des durées des retouches associées au chevauchement avec chaque prédécesseur. Si une activité ne chevauche qu'un seul prédécesseur, alors la durée totale des retouches est égale à la durée des retouches associées au chevauchement avec ce prédécesseur.

Afin d'évaluer la qualité des solutions fournies par la méthode heuristique, nous avons comparé les écarts par rapport aux solutions optimales obtenues en résolvant le modèle d'ordonnancement avec contraintes de ressources et possibilités de chevauchement proposé par Berthaut et al. (2011). Soit X_{jtm} , une variable binaire égale à 1 si et seulement si l'activité j est exécutée dans le mode m et se termine au temps t . Soit n , le nombre total d'activités. Les activités fictives 0 et $n + 1$, de durée nulle, correspondent respectivement au début et à la fin du projet. La fonction-objectif (5) du modèle de Berthaut et al. (2011) pour le RCPSp-OM minimise la durée totale du projet:

$$\text{Minimiser} \quad D = \sum_{t=EF_{n+1}}^{LF_{n+1}} t \cdot X_{n+1,t,1} \quad (5)$$

Le coût total induit par le chevauchement est égal à la somme des coûts supplémentaires de coordination engendrés par le chevauchement des activités et des coûts supplémentaires associés aux retouches. L'exécution des activités en parallèle nécessitent un effort supplémentaire de coordination et de communication entre les ressources. Dans cet article, on suppose que la durée des réunions de coordination et le coût d'utilisation des technologies de communication sont négligeables. Par conséquent, les coûts de coordination et de communication sont nuls. Toutefois, on considère que les ressources impliquées dans les retouches ajoutées à une activité correspondent, en quantité et en qualification, aux ressources utilisées dans la réalisation de l'activité. Le coût des retouches est donc égal au coût d'utilisation des ressources pour le travail supplémentaire:

$$C = \sum_{j \in S} \sum_{t=EF_j}^{LF_j} \sum_{m=1}^{m_j} \sum_{k \in R} X_{jtm} * r_{jm} * R_{jk} * \theta_k \quad (6)$$

où S et R représentent, respectivement, les ensembles des activités et des ressources. Les paramètres m_j , r_{jm} , R_{jk} et θ_k dénotent, respectivement, le nombre de modes d'exécution pour l'activité j , la durée des retouches associées au mode d'exécution m pour l'activité j , le nombre d'unités de ressource k nécessaires par période pour l'exécution de l'activité j et le coût horaire de la ressource k . Afin de prendre en compte le coût associé au chevauchement, la fonction-objectif (5) est modifiée comme suit :

Minimiser
$$P = \sum_{t=EF_{n+1}}^{LF_{n+1}} t \cdot X_{n+1,t,1} + \delta * C \quad (7)$$

où δ est choisi tel que $\delta * C < 1$. Ainsi, la fonction-objectif (7) minimise d'abord la durée d'exécution du projet, puis le coût des retouches. De même, afin de rechercher le meilleur compromis entre diminution du temps d'exécution d'un projet et augmentation du coût de réalisation, la fonction-objectif (5) est modifiée comme suit :

Maximiser
$$G = *(T_{ref} - \sum_{t=EF_{n+1}}^{LF_{n+1}} t \cdot X_{n+1,t,1}) - C \quad (8)$$

où T_{ref} est le temps de référence obtenu lors de l'exécution du projet sans chevauchement. La fonction-objectif (8) maximise le gain supplémentaire réel dégagé par l'exécution du projet en régime accéléré. Le coût d'opportunité est fixé à la valeur de 1000\$ par période. Ce coût modélise les primes (pénalités) liées à une avance (retard) dans la livraison du projet (Figure 7). On suppose que les primes (pénalités) sont proportionnelles au temps gagné (perdu). Dans la pratique, les valeurs des primes (pénalités) sont établies en fonction des termes du contrat entre la firme et le client.

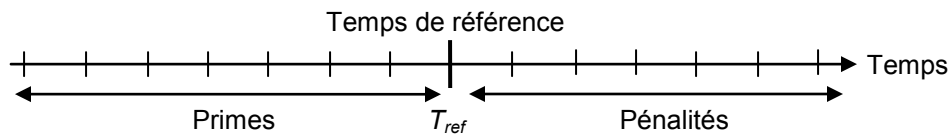


Figure 7. Primes et pénalités associées à l'exécution du projet

Tous les modèles, codés à l'aide du langage de modélisation AMPL Studio v1.6.j, sont résolus à l'aide du solveur CPLEX 12.2 sur un ordinateur personnel (2.22GHz et 3.00Go de RAM).

4.2 Analyse des résultats

Pour l'expérimentation numérique, quatre scénarios sont étudiés. Dans le premier scénario, les possibilités de chevauchement sont interdites et l'objectif consiste à minimiser la durée d'exécution du projet. Le second scénario permet également d'obtenir un ordonnancement de durée minimale pour l'exécution du projet, mais les possibilités de chevauchement sont permises. Dans le troisième scénario, les coûts des retouches associées au chevauchement d'activités sont pris en compte dans un objectif hiérarchique qui minimise d'abord la durée d'exécution du projet, puis le coût des retouches. Finalement, le quatrième scénario considère le compromis entre la diminution de la durée d'exécution du projet et l'augmentation des coûts associés au chevauchement d'activités. Notons que les scénarios 2 et 3 sont équivalents pour la méthode heuristique car cette

méthode est une approche de type constructif, i.e. qui construit la solution de durée minimale un élément à la fois, sans jamais remettre en question les choix passés. À chaque scénario est ainsi associé un problème à résoudre et un objectif à optimiser :

- Scénario 1: RCPSP, Min D (Section 4.1, équation (5));
- Scénario 2: RCPSP-OM, Min D (Section 4.1, équation (5));
- Scénario 3: RCPSP-OM, Min P (Section 4.1, équation (7));
- Scénario 4: RCPSP-OM, Max G (Section 4.1, équation (8)).

Le Tableau 2 présente les durées d'exécution (D) et les coûts des retouches (C) associés aux solutions obtenues à l'aide de la méthode exacte (OPT), MS Project (MSP) et la méthode heuristique (H) pour les différents scénarios. Par exemple, C_{OPT3} correspond au coût des retouches de la solution obtenue à l'aide de la méthode exacte en considérant la fonction-objectif (7).

Tableau 2. Comparaison des quatre scénarios

Projet	RS	Scénario 1		Scénario 2		Scénario 3				Scénario 4			
		D_{OPT1}	D_{MSP}	D_{OPT2}	C_{OPT2}	D_{OPT3}	C_{OPT3}	D_{H3}	C_{H3}	D_{OPT4}	C_{OPT4}	D_{H4}	C_{H4}
1	1	121	121	104	15 300	104	12 300	107	4 100	107	4 100	107	4 100
	0.75	121	125	104	15 300	104	13 100	107	4 100	107	4 100	107	4 100
	0.5	121	121	107	8 500	107	6 300	111	3 700	110	2 700	111	3 700
2	1	98	98	83	21 200	83	10 800	89	6 600	85	6 400	91	3 000
	0.75	98	100	85	15 000	85	9 200	92	4 000	85	6 800	92	4 000
	0.5	106	127	99	12 200	99	10 200	105	6 800	105	300	110	2 700
3	1	112	112	95	20 500	95	11 400	104	4 800	98	6 900	105	1 400
	0.75	112	121	98	14 700	98	9 900	102	11 100	100	6 500	107	5 600
	0.5	112	128	107	11 000	107	6 700	118	3 600	112	0	114	3 900

Notez que les durées d'exécution optimales sont les mêmes pour les scénarios 2 et 3. En effet, pour le Scénario 3, la méthode exacte trouve, parmi les solutions de durée minimale (Scénario 2), la solution à coût minimum. Les résultats du Tableau 2 révèlent que le chevauchement d'activités (Scénario 2, 3 et 4) permet de réduire la durée d'exécution des projets au détriment d'une augmentation du coût d'exécution causée par les retouches. Cependant, la prise en compte des coûts liés au chevauchement

d'activités dans la fonction d'évaluation (Scénarios 3 et 4) permet de limiter les retouches supplémentaires.

Le Tableau 3 compare les valeurs des bénéfices associés aux Scénarios 3 et 4. Ces valeurs sont calculées selon l'équation (7). Dans la plupart des cas, les bénéfices issus du compromis entre accélération et augmentation des coûts reliés au projet (Scénario 4) sont plus élevés que les bénéfices associés au Scénario 3. De plus, le Scénario 4 permet d'éviter les pertes engendrées par l'accélération de projets à l'aide du chevauchement d'activités. Toutefois, l'augmentation des bénéfices associés au Scénario 4 est obtenue en contrepartie d'une augmentation des durées d'exécution des projets. En effet, pour le Scénario 4, les durées d'exécution générées par la méthode exacte et la méthode heuristique sont souvent plus élevées que celles du Scénario 3 (voir Tableau 3).

Tableau 3. Comparaison des bénéfices (\$) associés aux Scénarios 3 et 4

Projet	RS	Méthode exacte		Heuristique	
		Scénario 3	Scénario 4	Scénario 3	Scénario 4
1	1	4 700	9 900	9 900	9 900
	0.75	3 900	9 900	13 900	13 900
	0.5	7 700	8 300	6 300	6 300
2	1	4 200	6 600	2 400	4 000
	0.75	3 800	6 200	4 000	4 000
	0.5	-3 200	700	15 200	14 300
3	1	5 600	7 100	3 200	5 600
	0.75	4 100	5 500	7 900	8 400
	0.5	-1 700	0	6 400	10 100

Le Tableau 4 présente, pour la méthode exacte, les écarts obtenus (%) lorsque les possibilités de chevauchement sont permises (Scénarios 2, 3 et 4). Dans la colonne 'Scénario 2', on observe que l'impact du chevauchement sur la durée d'exécution des projets diminue avec la sévérité des contraintes de ressources. Par exemple, la réduction de la durée d'exécution du projet 3 à l'aide du chevauchement d'activités varie de 15.18% lorsque $RS = 1$ à 4.46% lorsque $RS = 0.5$. La colonne 'Scénario 3' donnent les réductions de coûts associées à la prise en compte du coût des retouches dans la fonction-objectif. Dans tous les cas, les coûts des solutions optimales sont réduits par rapport aux coûts des solutions trouvées avec le Scénario 2. La prise en considération des coûts dans

la fonction-objectif (Scénario 3) permet de limiter les chevauchements inutiles d'activités, et donc, l'ajout de retouches supplémentaires. Toutefois, l'accélération de projets à l'aide du chevauchement d'activités peut engendrer des pertes (voir Tableau 3). Le Scénario 4 permet d'éviter cette possibilité en considérant le compromis entre l'accélération de l'exécution de projets et l'augmentation des coûts associés. La colonne 'Scénario 4' montre qu'une augmentation des durées d'exécution par rapport au Scénario 3 permet de réduire les coûts associés aux retouches.

Tableau 4. Comparaison des améliorations successives des scénarios 2, 3 et 4

Projet	RS	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	
		$(D_{OPT2}-D_{OPT1})/D_{OPT1}$	$(C_{OPT3}-C_{OPT2})/C_{OPT2}$	$(D_{OPT4}-D_{OPT3})/D_{OPT3}$	$(C_{OPT4}-C_{OPT3})/C_{OPT3}$
1	1	-14.05	-19.61	2.88	-66.67
	0.75	-14.05	-14.38	2.88	-68.70
	0.5	-11.57	-25.88	2.80	-57.14
2	1	-15.31	-49.06	2.41	-40.74
	0.75	-13.27	-38.67	0.00	-26.09
	0.5	-6.60	-16.39	6.06	-97.06
3	1	-15.18	-44.39	3.16	-39.47
	0.75	-12.50	-32.65	2.04	-34.34
	0.5	-4.46	-39.09	4.67	-100.00

Le Tableau 5 présente les temps de calcul nécessaires à la résolution des modèles associés aux Scénarios 2, 3 et 4. On observe que les temps de calcul dépendent du réseau d'activités considéré, de la sévérité des contraintes de ressources et du scénario étudié. En particulier, les temps de calcul nécessaires à la résolution du modèle de minimisation de la durée d'exécution avec prise en compte des coûts (Scénario 3) sont plus importants que les temps requis pour résoudre le modèle de base (Scénario 2). En fait, résoudre le modèle associé au Scénario 3 nécessite l'exploration de l'ensemble des solutions de durée minimale pour trouver la solution de coût minimal. De plus, la recherche du meilleur compromis entre réduction de la durée d'exécution et augmentation des coûts (Scénario 4) s'effectue plus rapidement que la recherche de solutions optimales aux modèles des Scénarios 2 et 3.

Tableau 5. Temps de calculs (secondes) associés à la résolution des modèles

Projet	RS	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
1	1	8	7	7
	0.75	22	14	12
	0.5	60	> 5000	20
2	1	12	84	8
	0.75	26	86	20
	0.5	> 5000	> 5000	2110
3	1	9	4	7
	0.75	13	99	13
	0.5	120	> 5000	20

Le Tableau 6 présente une évaluation des méthodes heuristiques. On observe tout d'abord que, pour l'outil d'ordonnancement MS Project, les écarts (%) par rapport aux durées d'exécution optimales (colonne (1)) sont d'autant plus importants que les contraintes de ressources sont sévères. Ce résultat, comparable aux résultats obtenus dans la littérature (Kolisch 1999), s'explique par la faible performance de l'outil MS Project qui utilise des règles heuristiques simples permettant d'élaborer rapidement un échancier de projet en tenant compte des contraintes données.

Tableau 6. Comparaison des heuristiques MSP, H3 et H4

Projet	RS	MSP	H3			H4			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	
		$(D_{MSP}-D_{OPT1})/D_{OPT1}$	$(D_{H3}-D_{OPT3})/D_{OPT3}$	$(D_{H3}-D_{MSP})/D_{MSP}$	$(D_{H4}-D_{OPT4})/D_{OPT4}$	$(D_{H4}-D_{MSP})/D_{MSP}$	$(D_{H4}-D_{H3})/D_{H3}$	$(C_{H4}-C_{H3})/C_{H3}$	
1	1	0.00	2.88	-11.57	0.00	-11.57	0.00	0.00	
	0.75	3.31	2.88	-14.40	0.00	-14.40	0.00	0.00	
	0.5	0.00	3.74	-8.26	0.91	-8.26	0.00	0.00	
2	1	0.00	7.23	-9.18	7.06	-7.14	2.25	-54.55	
	0.75	2.04	8.24	-8.00	8.24	-8.00	0.00	0.00	
	0.5	19.81	6.06	-17.32	4.76	-13.39	4.76	-60.29	
3	1	0.00	9.47	-7.14	7.14	-6.25	0.96	-70.83	
	0.75	8.04	4.08	-15.70	7.00	-11.57	4.90	-49.55	
	0.5	14.29	10.28	-7.81	1.79	-10.94	-3.39	8.33	

Les écarts de la colonne (2) montrent que la qualité des solutions obtenues suite à l'application de la méthode heuristique pour générer un échancier accéléré prenant en compte les modes de chevauchement et les coûts des retouches associés (Scénario 3) est

variable. En effet, pour le Scénario 3, l'utilisation de la méthode heuristique induit des écarts compris entre 2.88% et 10.28% par rapport aux solutions optimales. On remarque aussi que l'utilisation de la méthode heuristique pour générer un échéancier avec modes de chevauchement et coûts associés (Scénario 3) permet, dans certains cas, de compenser la faible performance de l'outil MS Project. Par exemple, pour le projet 2 avec $RS = 0.5$, l'écart observé par rapport à la solution optimale est de 19.81% pour l'outil et 6.06% pour la méthode heuristique. De plus, les écarts des colonnes (3) et (5) montrent que la méthode heuristique permet de réduire significativement les durées d'exécution des projets par rapport aux durées obtenues à l'aide de l'outil MS Project. Contrairement à la colonne (2), la colonne (4) montre que l'utilisation de la méthode heuristique pour générer un échéancier avec modes de chevauchement, coûts associés et pénalités liées à l'exécution du projet (Scénario 4) permet, dans certains cas, de générer des échéanciers dont les durées d'exécution sont proches des durées optimales. Enfin, les colonnes (6) et (7) montrent qu'une augmentation des durées d'exécution, par rapport au Scénario 3, permet de réduire les coûts associés aux retouches.

Le Tableau 7 donne le nombre d'itérations nécessaires pour atteindre une bonne solution à l'aide de la méthode heuristique pour le Scénario 3. Chaque itération correspond à un ordonnancement de projet. Le nombre d'itérations est assez faible et variable.

Tableau 7. Nombre d'itérations nécessaires à l'obtention d'une solution (Scénario 3)

		Réseau		
		1	2	3
RS	1	13	67	94
	0.75	14	5	135
	0.5	17	22	3

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une méthode heuristique pour le RCPSP-OM. Afin d'évaluer la qualité des solutions générées par la méthode heuristique, nous avons

comparé les écarts par rapport aux solutions optimales obtenues en résolvant le modèle proposé par Berthaut et al. (2011). Lorsque l'objectif consiste à minimiser la durée d'exécution d'un projet, les résultats montrent que la prise en compte des coûts associés au chevauchement d'activités permet de réduire de façon importante le coût des retouches. En revanche, lorsque l'objectif consiste à maximiser les gains associés à l'exécution d'un projet, la recherche du meilleur compromis entre accélération et augmentation des coûts reliés au projet permet d'éviter les pertes.

La résolution exacte du modèle de Berthaut et al. (2011) à l'aide d'un solveur de programmation linéaire en nombres entiers est difficilement applicable à des projets de grande taille à cause de l'augmentation rapide du temps de calcul. La méthode heuristique développée dans cet article est une approche de type constructif qui, dans certains cas, permet de produire de bonnes solutions en des temps de calcul raisonnables. Toutefois, la qualité des solutions obtenues est variable. Aussi, nous envisageons le développement de méthodes d'ordonnancement plus puissantes, comme la recherche avec tabous ou les algorithmes génétiques. Ces méthodes permettent de surmonter l'obstacle de l'optimalité locale et représentent donc des alternatives attrayantes par rapport aux heuristiques constructives.

Remerciements

Cet article a bénéficié du support financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada et de la Chaire de recherche Jarislowsky/SNC-Lavalin en gestion de projets internationaux. Ce support est grandement apprécié.

Références

- Berthaut, F., Grèze, L., Pellerin, R., Perrier, N., & Hajji, A. (2011). Optimal resource-constraint project scheduling with overlapping modes. *Proceedings of International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*. Metz, France: International Institute for Innovation, Industrial Engineering and Entrepreneurship, 299-308.
- Berthaut, F., Pellerin, R., Perrier, N., & Hajji, A. (2012). Time-cost trade-offs in resource-constraint project scheduling problems with overlapping modes. À paraître dans la revue *International Journal of Project Organisation and Management*.

- 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.
- Bogus, S. M., Molenaar, K. R., & Diekmann, J. E. (2005). Concurrent engineering approach to reducing design delivery time. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(11), 1179–1185.
- Browning, T. R. (2001). Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: A review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(3), 292–306.
- Brucker, P., Drexl, A., Moehring, R., Neumann, K., & Pesch, E. (1999). Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models, and methods. *European Journal of Operational Research*, 112(1), 3–41.
- Cho, S. H., & Eppinger S. D. (2005). A simulation-based process model for managing complex design projects. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 52(3), 316–328.
- Gerk, J. E. V., & Qassim, R. Y. (2008). Project Acceleration via Activity Crashing, Overlapping, and Substitution. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 55(4), 590–601.
- Gray, C. F., Langevin, Y., & Larson, E. W. (2007). *Management de projet*, Montréal: Chenelière McGraw-Hill.
- Grèze, L., Pellerin, R., Leclaire, P., & Perrier, N. (2011). Evaluating the effectiveness of task overlapping as a risk response strategy in engineering projects. À paraître dans la revue *International Journal of Project Organisation and Management*.
- 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.
- Herroelen, W. (2005). Project scheduling - Theory and practice. *Production and Operations Management*, 14(4), 413–432.
- Kolisch, R. (1999). Resource allocation capabilities of commercial project management software packages. *Interfaces*, 29(4), 19–31.

- Kolisch, R., & Hartmann, S. (2006). Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: An update. *European Journal of Operational Research*, 174(1), 23–37.
- Kolisch, R., & Sprecher, A. (1997). PSPLIB - A project scheduling problem library. *European Journal of Operational Research*, 96(1), 205–216.
- Kolisch, R., Sprecher, A., & Drexl, A. (1995). Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems. *Management Science*, 41(10), 1693–1703.
- Krishnan, V. (1996). Managing the simultaneous execution of coupled phases in concurrent product development. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 43(2), 210–217.
- Krishnan, V., Eppinger, S. D., & Whitney, D. E. (1997). A model-based framework to overlap product development activities. *Management Science*, 43(4), 437–451.
- Liberatore, M.J., & Pollack-Johnson, B. (2006). Extending project time–cost analysis by removing precedence relationships and task streaming. *International Journal of Project Management*, 24(6), 529–535.
- Lin, J., Chai, K. H., Brombacher, A. C., & Wong, Y. S. (2009). Optimal overlapping and functional interaction in product development. *European Journal of Operational Research*, 196(3), 1158–1169.
- Loch, C. H. & Terwiesch, C. (1998). Communication and uncertainty in concurrent engineering. *Management Science*, 44(8), 1032–1048.
- Maheswari, J. U., & Varghese, K. (2005). Project Scheduling using Dependency Structure Matrix. *International Journal of Project Management*, 23(3), 223–230.
- Neumann, K., & Zhan, J. (1995). Heuristics for the minimum project-duration problem with minimal and maximal time lags under fixed resource constraints. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 6(2), 145–154.
- Pellerin, R. (1997). *Modèle d'ordonnancement dynamique de projets de réfection*. Thèse de doctorat, Montréal, École Polytechnique de Montréal.

- Pritsker, A. A. B., Watters, L. J., & Wolfe, P. M. (1969). Multi-project scheduling with limited resources: a zero-one programming approach. *Management Science*, 16(1), 93–108.
- Roemer, T. A., Ahmadi, R., & Wang, R. H. (2000). Time-cost trade-offs in overlapped product development. *Operations Research*, 48(6), 858–865.
- Shue, L.-Y., & Zamani, R. (1999). Intelligent search method for project scheduling problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 10(3), 279–288.
- Steward, D. V. (1981). The Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 28(3), 71–74.
- Terwiesch, C., & Loch, C. H. (1999). Measuring the effectiveness of overlapping development activities. *Management Science*, 45(4), 455–465.
- Thiagarasu, V. & Devi, T. (2009) Multi-agent coordination in project scheduling: priority rules based resource allocation. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(2), 42–46.
- Wang, J. T. & Lin, Y. I. (2009). An overlapping process model to assess schedule risk for new product development. *Computers & Industrial Engineering*, 57(2), 460–474.