

Mesurer le coût de l'information incomplète en planification de projet

KAOUTHAR CHERKAOUI¹, ROBERT PELLERIN¹, PIERRE BAPTISTE¹, ALAIN HAÏT²

¹ ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL

C.P. 6079, Succ. Centre-ville, Montréal, H3C 3A7, Canada

kaouthar.cherkaoui@polymtl.ca, robert.pellerin@polymtl.ca, pierre.baptiste@polymtl.ca

² INSTITUT SUPERIEUR DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE (ISAE-SUPAERO), UNIVERSITE DE TOULOUSE

31055 TOULOUSE Cedex 4, France

alain.hait@isae-supero.fr

Résumé - En raison de l'incertitude et du manque d'informations, la planification à moyen et long terme des grands projets se fait couramment de façon agrégée. Ce type de planification, appelée aussi planification tactique, repose sur des modèles RCCP. Les niveaux d'agrégation dépendent toutefois du contexte du projet et sont pour la plupart établis de façon arbitraire par les planificateurs de projets. Le niveau de détail des lots de travaux et des ressources considérés ont toutefois un impact direct sur la précision et la fiabilité des plans de projets. Nous proposons ici de mesurer l'influence du niveau d'agrégation en planification tactique en comparant deux modèles RCCP sur la base de 450 instances de référence. Nos résultats montrent que le modèle plus agrégé permet d'obtenir de meilleurs temps de calcul, mais induit des coûts estimés trop optimistes. Nos expérimentations montrent toutefois que la simple réduction de la capacité considérée par un pourcentage fixe pour des instances comprenant un grand nombre de groupes de ressources permet d'obtenir des estimations de coûts beaucoup plus fiables.

Abstract - In large projects, planners tend to use aggregate planning techniques for long and medium-term to cope with uncertainties and lack of information. This type of planning, also referred as tactical planning relies on RCCP models. However, the aggregation levels depend on the context of the project and are usually arbitrarily established by project planners. The level of detail of work packages and resources have, however, a direct impact on the accuracy and reliability of the project plans. In this paper, we propose to measure the impact of aggregation in tactical planning by comparing two RCCP models based on a benchmark of 450 project instances. The results show that the model that is more aggregated performs considerably better in terms of computational times, but provides over-optimistic estimations for the project cost. However, our experimentation shows that a simple reduction of the considered resource capacities by a fixed percentage for the instances characterized by a large number of resource groups allows to obtain much more realistic estimations of project costs.

Mots clés - *Rough-Cut Capacity Planning*, agrégation, incertitude, planification de projets, horizon roulant

Keywords - *Rough-Cut Capacity Planning*, aggregation, uncertainty, project planning, rolling horizon

1 INTRODUCTION

L'établissement d'un échancier détaillé pour un grand projet d'ingénierie est souvent impossible ou impraticable en raison du manque d'information en début de projet. En effet, le nombre important de données et contraintes à considérer rend le problème très complexe et l'effort de planification devient déraisonnable. De plus, la conduite de projet en mode accéléré (*fast tracking*) oblige la production d'un plan de projet avant même d'avoir complété les phases initiales de conception ou d'ingénierie. Dans ce contexte, il est donc normal de procéder à une planification sur un horizon roulant où l'on procède à une mise à jour régulière de l'échancier afin de tenir compte des informations qui se précisent avec le temps. La planification de

tels projets se fait ainsi dans la pratique de façon hiérarchique [AACE International, 2010]. Des échanciers agrégés sont développés par le maître d'œuvre principal pour la planification à moyen et long terme, tandis que des échanciers détaillés sont utilisés pour la planification à court terme et sont souvent développés par les entrepreneurs et sous-traitants [Cherkaoui et al., 2013].

Dans la littérature, plusieurs modèles permettent de produire des échanciers agrégés qui sont communément appelés *Rough Cut Capacity Planning* (RCCP) *models*. Ces modèles sont destinés à une planification tactique des capacités de ressources et à la détermination de dates jalons fiables [De Boer, 1998]. On planifie l'exécution des lots de travaux qui consistent en un

regroupement de plusieurs activités sur un horizon de temps discrétisé en périodes. Les charges de travail des lots de travaux sont estimées de façon grossière ainsi que les capacités des ressources sur les périodes. La charge de travail d'un lot correspond à ses exigences totales en ressources en termes d'unités ressources-temps [Fündeling et Trautmann, 2010]. Les durées des lots ne sont pas connues au préalable et leur consommation de ressources peut varier d'une période à l'autre.

Cependant, il faut reconnaître que planifier de façon agrégée pour faire face au manque d'informations disponibles peut avoir un impact négatif sur la précision et fiabilité des estimations de coûts et délais communiqués aux différentes parties prenantes du projet. Malheureusement, la littérature ne permet pas de mesurer le coût de planifier avec de l'information incomplète et le niveau de planification utilisé par les planificateurs de projets est bien souvent établi de façon arbitraire.

Afin de répondre à cette problématique, nous proposons ici de comparer les estimations de coût produites par deux modèles RCCP utilisant différents niveaux d'agrégation. Le premier modèle considère que toutes les périodes ont une durée égale à une unité de temps. Il a été proposé par Haït et Baydoun [2012]. Le deuxième modèle généralise le premier modèle en considérant les périodes éloignées plus agrégées que les premières périodes. En effet, les quatre premières périodes ont une durée d'une unité de temps alors que les autres périodes sont agrégées par un facteur de 4, c'est à dire que quatre périodes du premier modèle correspondent à une seule période agrégée dans le deuxième modèle. Une approche de planification réactive sera notamment utilisée afin d'évaluer la robustesse des coûts estimés par les modèles agrégés dans un contexte incertain.

La suite de cet article est structurée comme suit. La section 2 présente une revue de littérature des modèles RCCP existants ainsi qu'une revue des approches d'ordonnancement réactif. La section 3 présente un modèle RCCP généralisé qui permet d'intégrer plusieurs niveaux de planification. La section 4 fournit les résultats des comparaisons numériques entre le modèle agrégé proposé et le modèle détaillé. La section 5 présente une approche de planification réactive pour le problème RCCP et présente les résultats de l'application de cette approche sur le modèle agrégé.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

Le problème RCCP est décrit par un ensemble de lots de travaux reliés par des relations de précedence et un certain nombre de ressources indépendantes. Chaque lot de travail a une date de début au plus tôt, un certain nombre d'unités requises de chaque type de ressource ainsi qu'une durée minimale résultant de la quantité maximale de ressources pouvant lui être allouée par période. L'horizon de temps est discrétisé en périodes sur lesquelles les capacités de ressources sont définies globalement. Le problème consiste à déterminer les périodes sur lesquelles les lots de travaux sont exécutés ainsi que la proportion de la charge qui y est actuellement réalisée. Deux approches RCCP peuvent être distinguées: *Resource-driven* RCCP et *Time-driven* RCCP. La première considère les contraintes de ressources rigides et son but est de minimiser le retard du projet ou minimiser sa durée, tandis que la deuxième approche autorise l'augmentation des capacités régulières par des capacités non-régulières à un certain coût. Ces dernières peuvent provenir par exemple de la sous-traitance, le recrutement de personnel supplémentaire ou le

recours à des heures supplémentaires [Wullink, 2005]. L'objectif de cette deuxième approche est de minimiser le coût de la capacité non régulière tout en respectant les dates d'échéances.

Parmi les modèles RCCP proposés dans la littérature, Hans [2001] propose une méthode de résolution exacte basée sur le concept de plan de projet, qui spécifie pour chaque lot de travail les périodes pendant lesquelles il peut être exécuté. Le calendrier de projet détermine par la suite la portion du lot qui sera exécutée sur chacune de ces périodes. L'auteur tient compte des relations de précedence de façon implicite en interdisant à deux lots reliés par une relation de précedence d'être exécutés sur la même période, ou bien en autorisant un lot à être exécuté sur la même période que son prédécesseur sans garantir leur succession dans le temps. Afin de réduire les risques d'infaisabilité, l'auteur propose de limiter le nombre de lots pouvant s'exécuter sur une même période. Haït et Baydoun [2012] proposent un modèle PLPNE (programmation linéaire partiellement en nombres entiers) qui combine l'utilisation de variables continues pour la représentation des dates de début et de fin des lots de travaux avec des variables discrètes pour une considération périodique des contraintes de ressources. Cette approche permet de contourner le problème lié aux liens de précedence soulevé par Hans [2001].

Certains modèles d'ordonnancement RCPSVP (*Resource-Constrained Project scheduling problem*) normalement proposés pour le niveau opérationnel peuvent également être appliqués au niveau tactique puisqu'ils ne considèrent pas des durées prédéfinies pour les activités et permettent de varier leur consommation en ressources d'une période à l'autre. Les durées des périodes doivent toutefois être adaptées en conséquence et les lots de travaux considérés au lieu des activités détaillées. Ces modèles sont appelés dans la littérature RCPSVP (*RCPSVP with variable intensity activities*) ou FRCPSVP (*RCPSVP with flexible resource profiles*). On cite notamment les modèles PLPNE proposés par Kis [2005] et Naber et Kolisch [2014]. Plusieurs heuristiques ont également été proposées pour le problème RCCP, incluant des heuristiques constructives et des heuristiques basées sur des techniques de programmation linéaire [De Boer, 1998; Gademann et Schutten, 2005; Wullink, 2005].

Planifier de façon agrégée permet certes de minimiser l'effort de planification, mais peut conduire à des estimations peu réalistes. En effet, moins les données d'entrée sont détaillées, moins les valeurs de sortie du modèle de planification sont précises. Ceci peut conduire à des incohérences en passant à des niveaux plus détaillés d'ordonnancement où les données sont désagrégées.

Afin de mesurer l'impact de cette agrégation, nous allons comparer les estimations de coût obtenues par deux modèles RCCP, l'un étant plus agrégé que l'autre à moyen et long terme. En effet, dans le contexte des grands projets d'ingénierie et de construction, il est souvent difficile de planifier en détail les activités d'exécution lors des premières phases d'un projet. Il est de plus courant de voir la phase d'ingénierie chevaucher les phases d'approvisionnement et de construction, permettant ainsi de commencer les travaux avant de terminer la conception des ouvrages. Même la capacité des ressources sur les périodes lointaines est rarement connue avec le même niveau de précision que les périodes à court terme. Afin d'illustrer cette réalité, le premier modèle RCCP considérera que toutes les périodes ont une durée d'une unité de temps, tandis que le deuxième modèle plus agrégé considérera qu'uniquement les quatre premières périodes ont une durée d'une unité de temps et que les autres

périodes ont une durée de quatre unités de temps chacune. Les capacités des ressources sur les périodes agrégées seront adaptées en conséquence.

Afin de mieux cerner l'impact de planifier avec de l'information manquante, une approche de planification réactive sera appliquée sur la base d'un horizon roulant afin d'évaluer la robustesse des plans générés par le modèle agrégé dans un contexte incertain. La littérature sur les approches de planification réactives est à notre connaissance inexistante pour le niveau de planification tactique. Plusieurs approches d'ordonnancement réactif sont par contre proposées pour le niveau d'ordonnancement détaillé. Elles ont pour but de réviser ou ré-optimiser un échéancier quand un événement imprévu se produit [Pellerin, 1997; Van de Vonder et al., 2007b]. Ces approches ne sont cependant pas adaptées au niveau tactique. En effet, la majorité de ces méthodes sont basées sur les politiques d'ordonnancement. Une politique d'ordonnancement est un processus de décision qui définit les activités à commencer à chaque point de décision, sachant que les points de décision correspondent aux dates de fin des activités [Van de Vonder et al., 2007a]. Cependant, les décisions de re-planification doivent être prises sur une base périodique au niveau tactique, puisque les capacités de ressources sont considérées globalement sur les périodes et que le taux d'utilisation des ressources par les lots de travaux peut varier d'une période à l'autre. Nous utiliserons donc dans cet article une approche de planification réactive plus adaptée au niveau de planification tactique.

3 MODELE RCCP INTEGRANT DIFFERENTS NIVEAUX D'AGREGATION

Le modèle présenté dans cette section résout le problème de *time-driven* RCCP et représente une extension du modèle de Haït et Baydoun [2012]. Les notations sont présentées dans le Tableau 1 et Tableau 2.

La fonction objectif (1) minimise le coût de l'utilisation des ressources non-régulières.

$$\text{Minimiser } \sum_{r \in R} \sum_{p \in P} yext_{rp} \quad (1)$$

Les contraintes principales du modèle sont les suivantes:

$$ts_i \geq \sum_{k=1}^p D_k \cdot (1 - zs_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (2)$$

$$ts_i \leq \sum_{k=1}^p D_k + \left(H - \sum_{k=1}^p D_k \right) \cdot (1 - zs_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (3)$$

$$zs_{ip} \geq zs_{ip-1} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (4)$$

$$d_{ip} \leq D_p \cdot (zs_{ip} - zf_{ip-1}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (5)$$

$$d_{ip} \geq D_p \cdot (zs_{ip-1} - zf_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (6)$$

$$d_{ip} \geq tf_i - \sum_{k=1}^p D_k + D_p \cdot zs_{ip-1} - H \cdot (1 - zf_{ip}) \quad \forall i \in I, p \in P \quad (7)$$

$$d_{ip} \geq \sum_{k=1}^p D_k \cdot (1 - zs_{ip-1}) - ts_i - D_p \cdot zf_{ip} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (8)$$

$$\sum_{p \in P} d_{ip} = tf_i - ts_i \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$ts_i \geq RD_i \quad \forall i \in I \quad (10)$$

$$ts_i \geq tf_j \quad \forall i \in I, j \in Pred_i \quad (11)$$

$$x_{ip} \cdot \sum_{r \in R} Q_{ri} \leq Q_i^{\max} \cdot d_{ip} \quad \forall i \in I, p \in P \quad (12)$$

$$\sum_{p \in P} x_{ip} = 1 \quad \forall i \in I \quad (13)$$

$$yint_{rp} + yext_{rp} = \sum_{i \in I} x_{ip} \cdot Q_i \quad \forall r \in R, p \in P \quad (14)$$

$$yint_{rp} \leq K_{rp} \quad \forall r \in R, p \in P \quad (15)$$

Tableau 1. Nomenclature: ensembles et paramètres

Ensemble ou Paramètre	Description
P	Ensemble des périodes de temps ($p \in P$)
I	Ensemble des lots de travaux ($i \in I$)
R	Ensemble des groupes de ressources ($r \in R$)
D_p	Durée de la période p (en unités de temps)
H	Horizon de temps: $H = \sum_{p \in P} D_p$
RD_i	Date de début au plus tôt du lot de travail i
Q_i^{\max}	Charge de travail maximale pouvant être assignée au lot i durant une unité de temps
Q_{ri}	Charge de travail requise par le lot i du groupe de ressources r
$Pred_i$	Ensemble des prédécesseurs du lot i
K_{rp}	Capacité disponible du groupe de ressources r durant la période p

Tableau 2. Nomenclature: variables

Variable	Description
ts_i, tf_i	Date de début et de fin du lot de travail i
zs_{ip}	Variable binaire qui vaut 1 si ts_i se trouve dans la période p ou avant
zf_{ip}	Variable binaire qui vaut 1 si tf_i se trouve dans la période p ou avant
d_{ip}	Durée du lot i durant la période p ($0 \leq d_{ip} \leq D_p$)
x_{ip}	Intensité du lot i durant la période p ($0 \leq x_{ip} \leq 1$)
$yint_{rp}$	Utilisation interne de la ressource r sur la période p
$yext_{rp}$	Utilisation externe de la ressource r sur la période p

Les contraintes (2) à (4) assurent la relation entre les variables continues et binaires afin de situer les dates de début des lots de travaux. La variable zs_{ip} vaut 1 si le lot i commence avant ou durant la période p , et 0 sinon. Le même principe s'applique pour les dates de fin tf_i et les variables binaires zf_{ip} . Les contraintes (5) à (9) assurent la relation entre les durées des lots de travaux d_{ip} sur les périodes d'une part et les variables binaires zs_{ip} et zf_{ip} et les dates de début et de fin ts_i et tf_i d'autre part. Les contraintes (10) assurent que les lots de travaux ne commencent pas avant leurs dates de début au plus tôt. Les contraintes (11) assurent le respect des liens de précédence. Les contraintes (12) assurent que la charge allouée à un lot de travail durant une période ne dépasse pas la quantité maximale de la charge permise pour ce dernier. Les contraintes (13) assurent que les charges totales requises par les lots sont respectées. Finalement, les contraintes (14) et (15) permettent de définir avec la fonction objectif l'utilisation interne et externe des ressources sur chaque période de temps.

4 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Nous comparons ici le modèle RCCP généralisé présenté dans la section précédente, que l'on nommera A , au modèle RCCP plus

détaillé proposé par Haït et Baydoun [2012], que l'on nommera *B*. On considère dans le modèle *A* que les durées des quatre premières périodes sont égales à une unité de temps, que la durée de la cinquième période est égale au reste de la division euclidienne de l'horizon par quatre et que le reste des périodes ont une durée égale à quatre unités de temps. Dans le modèle *B*, toutes les périodes ont une durée égale à une unité de temps. Les capacités des périodes agrégées dans le modèle *A* sont égales à la somme des capacités des périodes détaillées correspondantes dans le modèle *B*. Afin de comparer les performances des deux modèles, nous utilisons les instances générées par De Boer [1998] et qui sont couramment utilisées pour tester les modèles RCCP. Chaque instance représente un projet et est caractérisée par trois paramètres, à savoir le nombre de lots de travaux: *N*, le nombre de groupes de ressources: *K* et la marge moyenne: *S*. Nous ne considérons pas le paramètre de la marge moyenne dans nos expérimentations puisque son calcul est basé sur les dates de fin au plus tard des lots de travaux, que nous ne considérons pas prédéfinies à ce niveau de planification. Les paramètres *N* et *K* peuvent prendre trois valeurs chacun: *N* = 10, 20 ou 50 et *K* = 3, 10 ou 20. Chaque combinaison des valeurs des deux paramètres représente une classe d'instances, et chacune des classes comporte 50 répétitions, ce qui donne un total de 450 instances. Les tests ont été effectués sur une grille de calcul comportant 26 PCs avec des processeurs 3.07 GHz Intel(R) Xeon(R) X5675 sous Linux, en utilisant le solveur IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6.0.1 avec une limite de temps imposée de 50000 secondes.

Le Tableau 3 montre le temps CPU moyen à l'optimalité pour les instances atteignant l'optimalité avec les deux modèles et le temps CPU moyen sur toutes les instances. Nous constatons que le modèle agrégé *A* a des temps de calculs significativement meilleurs que ceux du modèle *B* dû au nombre réduit de périodes qui implique une diminution significative du nombre de variables et contraintes. Le Tableau 4 montre les déviations moyennes entre le coût de projet trouvé par le modèle *A* et celui trouvé par le modèle *B*, ainsi que les écarts types de ces déviations pour chaque classe d'instances. Nous constatons que les coûts obtenus par le modèle *A* sont plus optimistes que ceux trouvés par le modèle *B*. Il est à noter que pour toutes les instances, le coût de projet obtenu par le modèle *A* est inférieur à celui obtenu par le modèle *B*. D'après les résultats, l'écart entre les coûts obtenus par les deux modèles est d'autant plus grand que le nombre de ressources est plus petit et le nombre de lots de travaux est plus grand. L'effet du nombre de ressources est toutefois plus important que celui du nombre de lots de travaux. Il y a également une plus grande variabilité des résultats quand le nombre de ressources est plus petit. Cette amélioration des coûts obtenus avec le modèle *A* peut être justifiée par la plus grande flexibilité dans l'allocation des ressources, puisque les capacités sont données pour des périodes plus larges. Cependant, en passant à un niveau d'ordonnancement plus détaillé, les périodes agrégées du modèle *A* seront désagrégées ainsi que les contraintes de ressources. L'allocation des ressources perdra de sa flexibilité ce qui engendrera des coûts plus élevés. Ainsi, les coûts de projet estimés par le modèle agrégé *A* sont certes inférieurs à ceux estimés par le modèle désagrégé *B*, mais sont moins réalistes. Afin d'illustrer ce phénomène de perte de flexibilité dans l'allocation des ressources et par conséquent l'augmentation des coûts en passant à un niveau désagrégé, nous fournissons l'exemple d'un projet composé de deux lots utilisant

une seule ressource *r*. Le premier lot requière 14 unités de cette ressource tandis que le deuxième lot en requière 24 unités. Supposons dans un premier temps que le projet sera planifié sur une seule période agrégée. La capacité disponible de la ressource *r* sur cette période est estimée à 40 unités. Le projet peut donc être planifié de façon optimale avec un coût nul comme le montre la Figure 1. Cependant, supposons qu'en passant à un niveau plus détaillé, on se rend compte que les capacités sur les périodes détaillées (obtenues en désagrégant la période agrégée par un facteur de 4) sont de: 5, 15, 10 et 10 unités respectivement. En adoptant l'échéancier de la Figure 1, le coût réel du projet est de plutôt 6 comme le montre la Figure 2.

Tableau 3. Temps de calcul (en secondes)

	Temps CPU moyen à l'optimalité	Temps CPU moyen*
Modèle <i>A</i>	8,5	2597,8
Modèle <i>B</i>	2130,9	12662,2

* La limite de temps de 50000 secondes est utilisée pour les instances qui n'atteignent pas l'optimalité

Tableau 4. Ecart entre les coûts obtenus avec le modèle *A* et le modèle *B*

	Déviations moyennes	Ecart-type
<i>K</i> = 3	-56,6%	32,6%
<i>N</i> = 10	-43,7%	30,2%
<i>N</i> = 20	-53,1%	32,1%
<i>N</i> = 50	-73,0%	28,6%
<i>K</i> = 10	-33,8%	15,2%
<i>N</i> = 10	-22,5%	9,5%
<i>N</i> = 20	-31,7%	9,3%
<i>N</i> = 50	-47,2%	14,5%
<i>K</i> = 20	-20,1%	8,7%
<i>N</i> = 10	-12,1%	4,2%
<i>N</i> = 20	-18,5%	3,6%
<i>N</i> = 50	-29,7%	6,2%

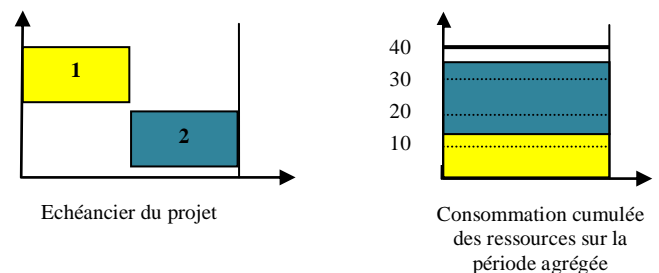


Figure 1. Planification agrégée

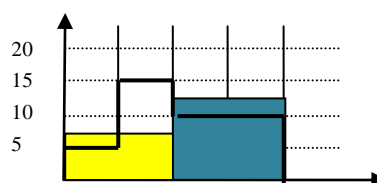


Figure 2. Utilisation des ressources par période détaillée

Ces résultats nous montrent donc les conséquences de planifier de façon agrégée dans les contextes où l'on manque d'informations sur la fiabilité des coûts estimés des projets. Afin d'estimer des coûts plus réalistes tout en planifiant de façon agrégée à moyen et long terme, il est possible de réduire les capacités des périodes agrégées afin de rendre les contraintes de ressources plus exigeantes. Ceci n'affectera pas normalement la qualité de l'échéancier puisque la planification des projets caractérisés par une grande incertitude se fait souvent de façon itérative sur la base d'un horizon roulant afin d'intégrer au fur et à mesure les nouvelles informations dont on dispose. C'est donc uniquement la première partie du plan généré qui est adoptée tandis que le reste du plan est révisé par la suite. La qualité du plan généré n'est donc pas altérée par la réduction des capacités de ressources sur les périodes agrégées éloignées, puisque cette partie du plan doit être de toutes les façons révisée ultérieurement. Cette réduction de capacité nous permettra par contre de communiquer un coût de projet plus fiable au client et autres parties prenantes du projet. Cette pratique est d'ailleurs courante en gestions de projets où les planificateurs tentent de minimiser l'impact des données incertaines en introduisant des ressources et/ou des périodes tampons.

Pour chaque instance testée pour résoudre le modèle agrégé *A*, nous avons donc déterminé le pourcentage de réduction nécessaire des capacités des périodes agrégées pour nous rapprocher le plus possible du coût estimé par le modèle détaillé *B*. Le Tableau 5 rapporte pour chaque classe d'instances la moyenne et écart-type du pourcentage de réduction nécessaire pour obtenir des estimations de coûts comparables au modèle *B*. On peut voir aussi pour chaque classe, la moyenne et écart-type des déviations du coût estimé par le modèle *A* via celui estimé par le modèle *B* après avoir appliqué la réduction. Nous en concluons qu'avec une réduction adéquate des capacités des périodes agrégées, nous nous rapprochons beaucoup des coûts estimés par le modèle *B*. Cependant, en supposant que nous ne disposons pas dans la réalité des données nécessaires pour résoudre un modèle plus détaillé, nous ne pouvons pas connaître pas a priori le coût généré par un tel modèle désagrégé représenté dans nos expérimentations par le modèle *B*. Il faut donc essayer de prédire le pourcentage de réduction nécessaire des périodes agrégées sans connaissance préalable du coût ciblé du modèle désagrégé. Pour ce faire, nous avons essayé d'identifier l'impact des paramètres de nos instances, à savoir le nombre de groupes de ressources et nombre de lots de travaux sur le pourcentage nécessaire de réduction des capacités. Nous avons donc effectué une analyse de la variance (ANOVA) à deux facteurs. L'analyse montre que les deux paramètres *N* et *K* ont un effet significatif sur le pourcentage de réduction des capacités avec un effet plus important du paramètre *K* (valeur-p du paramètre *K* = 3,54E-14 et valeur-p du paramètre *N* = 1,58E-03). Les Figure 3 et Figure 4 montrent les valeurs moyennes ainsi que l'intervalle de confiance à 95% du pourcentage de réduction des capacités regroupé par *K* et *N* respectivement. Nous pouvons en déduire l'effet plus significatif et plus facilement interprétable du paramètre *K*. En effet, quand le nombre de ressources est plus grand, le pourcentage de réduction des capacités des périodes agrégées est plus grand (en valeur absolue). Cependant, l'impact du paramètre *K* est moins prononcé quand on passe du groupe *K* = 10 au groupe *K* = 20 comparativement au passage du groupe *K* = 3 au groupe *K* = 10. Nous pouvons donc en déduire que pour des projets comportant un nombre encore plus important de groupes

de ressources ($K > 20$), l'effet de ce paramètre sera probablement encore moins prononcé.

Comme expliqué auparavant, nous supposons ne pas connaître dans la réalité le coût obtenu par le modèle *B*. Nous avons donc étudié la possibilité de prédire le pourcentage de réduction nécessaire des capacités des périodes agrégées pour avoir des résultats comparables avec le modèle détaillé juste en fonction des paramètres de nos instances. Nous avons ainsi testé d'appliquer le même pourcentage de réduction sur toutes les instances d'une même classe (c'est à dire ayant le même nombre de ressources et de lots de travaux) en prenant le pourcentage de réduction moyen de la classe. Nous avons également testé d'appliquer le même pourcentage de réduction sur toutes les instances possédant un même nombre de ressources en considérant de même le pourcentage de réduction moyen sur ce groupe d'instances. Les résultats obtenus sont rapportés dans le Tableau 6.

Tableau 5. Résultats de la réduction des capacités des périodes agrégées sur les écarts de coûts entre les deux modèles

	Pourcentage de réduction moyen	Ecart-type du pourcentage de réduction	Déviaton moyenne du coût	Ecart-type de la déviaton du coût
<i>K</i> = 3	-14,9%	7,4%	-0,6%	3,7%
<i>N</i> = 10	-15,3%	9,0%	0,2%	1,4%
<i>N</i> = 20	-15,9%	8,1%	-0,4%	1,6%
<i>N</i> = 50	-13,5%	4,4%	-1,5%	6,0%
<i>K</i> = 10	-18,9%	4,7%	0,0%	0,7%
<i>N</i> = 10	-19,4%	5,2%	-0,1%	0,4%
<i>N</i> = 20	-19,9%	4,9%	-0,1%	0,5%
<i>N</i> = 50	-17,5%	3,6%	0,1%	1,0%
<i>K</i> = 20	-20,0%	4,7%	0,1%	0,4%
<i>N</i> = 10	-19,7%	6,5%	0,0%	0,2%
<i>N</i> = 20	-21,2%	4,2%	0,0%	0,3%
<i>N</i> = 50	-19,0%	2,4%	0,2%	0,5%

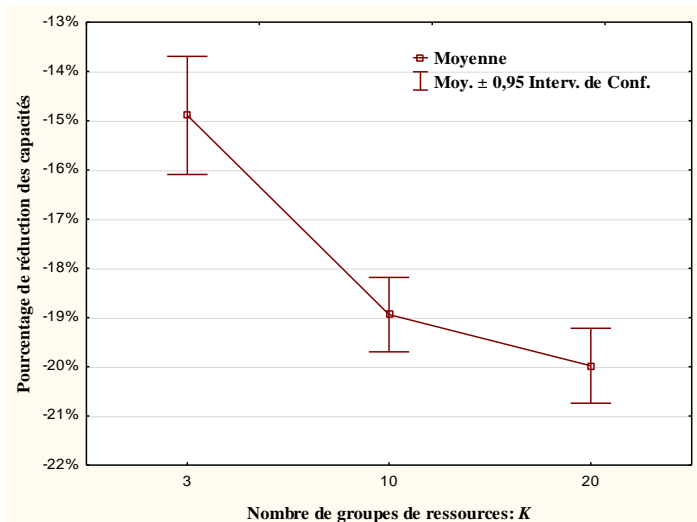


Figure 3. Graphe des valeurs moyennes du pourcentage de réduction des capacités regroupé par nombre de groupes de ressources

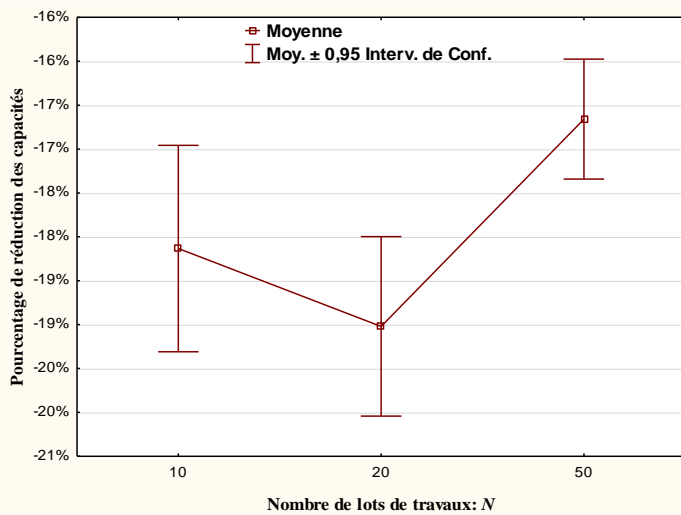


Figure 4. Graphe des valeurs moyennes du pourcentage de réduction des capacités regroupé par nombre de lots de travaux

Tableau 6. Résultats de la réduction des capacités des périodes agrégées selon les paramètres de l'instance sur la performance du modèle A

	Réduction selon N et K		Réduction selon K	
	Déviaton moyenne du coût	Ecart-type de la déviaton du coût	Déviaton moyenne du coût	Ecart-type de la déviaton du coût
K = 3	12,0%	61,9%	16,3%	71,0%
N = 10	6,3%	38,4%	4,8%	38,1%
N = 20	5,1%	59,7%	-0,3%	55,5%
N = 50	24,8%	79,8%	44,5%	97,8%
K = 10	0,0%	9,2%	0,5%	9,0%
N = 10	0,1%	7,0%	-0,6%	7,0%
N = 20	0,4%	8,8%	-1,4%	8,7%
N = 50	-0,7%	12,2%	4,7%	10,6%
K = 20	0,1%	4,2%	0,0%	4,2%
N = 10	0,3%	4,3%	0,5%	4,3%
N = 20	0,3%	4,0%	-0,9%	3,9%
N = 50	-0,6%	4,3%	0,8%	4,4%

Nous constatons qu'il y a beaucoup de dispersion dans les résultats quand le nombre de groupes de ressources: K est très petit. Quand K augmente, les résultats sont nettement moins dispersés, en particulier quand K devient très grand ($K = 20$). On remarque aussi que nous avons plus de dispersion dans les résultats quand le nombre de lots de travaux: N est plus grand. Cependant, l'effet de N tend à s'annuler quand K est très grand ($K = 20$). Prédire le pourcentage de réduction des capacités uniquement en fonction de K ne détériore pas les résultats quand K est important.

Afin de mesurer l'impact de l'imprécision des données par rapport à la prédiction du pourcentage de réduction des capacités, nous avons calculé pour chaque instance l'évolution moyenne de la déviation du coût du modèle A par rapport à celui du modèle B quand on réduit les capacités des périodes agrégées

d'un pourcentage supplémentaire de 1%. Afin d'illustrer la démarche suivie, supposons que le meilleur pourcentage de réduction trouvé pour une instance donnée est de 18%. Nous avons donc testé toutes les réductions suivantes: 18%-5%, 18%-4%, ... 18%+5%. Et nous avons calculé à chaque fois la déviation du coût du modèle A par rapport à celui du modèle B. Nous avons ensuite calculé la moyenne de l'évolution de cette déviation quand on applique une réduction supplémentaire de 1%.

Nous constatons que des écarts dans l'estimation du pourcentage de réduction des capacités des périodes agrégées n'a pas beaucoup d'impact sur les résultats pour les instances où le paramètre K est important.

Tableau 7. Evolution de la déviation entre les coûts des deux modèles en appliquant une réduction supplémentaire de 1%

	Moyenne de l'évolution de la déviation entre les coûts des deux modèles	Ecart-type de l'évolution de la déviation entre les coûts des deux modèles
$K = 3$	8,8%	10,0%
$K = 10$	2,2%	1,1%
$K = 20$	1,1%	0,6%

A partir de toutes ces analyses, nous pouvons déduire que pour les projets complexes caractérisés par un grand nombre de groupes de ressources, planifier de façon agrégée à moyen et long terme tout en considérant les capacités de ressources sur les périodes agrégées réduites d'à peu près 20% nous permet d'établir des estimations de coût très proches de celles que l'on aurait trouvé en résolvant un modèle plus détaillé, où chaque période agrégée est désagrégée en quatre périodes. Ce constat est d'une grande utilité pour les planificateurs de projets. Ainsi, il semble qu'une simple politique de réduction de la capacité considérée exprimée simplement en pourcentage permet d'aboutir à des échéanciers robustes.

Dans la prochaine section, nous proposons une méthode de planification réactive qui nous permettra de mesurer la robustesse du modèle A ainsi que celle du modèle A après avoir réduit les capacités des périodes agrégées, qu'on nommera *A-Red*. La notion de robustesse d'un échéancier est souvent reliée dans la littérature à la dimension de temps. Van de Vonder et al. [2007b] définissent deux types de robustesse. La robustesse de la qualité d'un échéancier et la robustesse de la solution d'un échéancier. La première mesure réfère à l'insensibilité d'un projet aux perturbations qui affectent les indicateurs de performances utilisées pour évaluer sa qualité. En d'autres termes, la robustesse de la qualité d'un échéancier est définie comme étant l'insensibilité de la valeur de la fonction objectif aux perturbations dans les valeurs des données du problème. Quant à la robustesse de la solution, elle est mesurée par l'insensibilité des dates de début des activités aux perturbations des données. Dans cet article, nous utilisons la première mesure de robustesse compte tenu que les dates planifiées sur des lots de travaux n'ont que peu de valeur dans un processus de planification tactique utilisant un horizon roulant. Pour la suite, nous considérons un échéancier comme robuste si le coût estimé du projet est peu affecté par les perturbations dans les données d'entrée.

5 MESURER LA ROBUSTESSE DU MODELE RCCP AGREGE

5.1 Approche de planification réactive pour le niveau tactique

L'approche de planification réactive proposée permet de réagir aux perturbations dans les charges de travail des lots de travaux et à l'évolution dans la connaissance des capacités disponibles des ressources. La démarche consiste à régénérer de façon périodique un nouvel échéancier tout en simulant l'exécution du projet entre deux points successifs de re-planification, appelés points de décision. La démarche globale est illustrée dans la Figure 5. Un nouvel échéancier est donc généré après chaque période d'une unité de temps, en utilisant le même modèle RCCP qui a permis de générer l'échéancier de base. L'échéancier de base correspond à l'échéancier généré pour l'ensemble du projet avec les estimations initiales des données. Le réseau du projet est toutefois modifié comme suit: les lots de travaux déjà complétés sont omis du réseau, les lots qui sont en cours d'exécution sont gardés avec leur charge réelle restante, tandis que les lots non encore débutés sont considérés avec leur charge de travail estimée dans l'échéancier de base. L'horizon de temps est diminué d'une unité de temps et le vecteur des durées des périodes est mis à jour pour les modèles *A* et *A-Red* en appliquant le même mécanisme utilisé dans les instances de base. Les quatre ou cinq premières périodes sont donc considérées détaillées et le reste des périodes sont agrégées. Les capacités des périodes sont adaptées en conséquence pour le modèle *A*. Pour le modèle *A-Red*, on applique le même pourcentage de réduction des capacités des périodes agrégées utilisé dans les instances de base. La Figure 6 illustre un exemple de mise à jour du vecteur des durées des périodes.

Entre deux points successifs de décision, nous simulons l'exécution du projet en allouant les ressources aux lots de travaux actifs sur la période simulée et en se basant sur les informations les plus à jour sur leurs charges de travail (étape 2 dans la Figure 5). Les ressources disponibles durant la période simulée correspondent aux capacités internes ainsi qu'aux ressources externes prévues d'être utilisées selon le dernier échéancier généré (l'échéancier généré à $t = p-1$). Les lots de travaux qui sont en cours au début de la période simulée p sont exécutés comme prévu par le dernier échéancier puisqu'ils sont planifiés avec leurs charges restantes réelles. Une liste de priorité est ensuite générée pour les lots prévus de commencer durant cette période p (selon le dernier échéancier généré) en les ordonnant en ordre croissant de leurs dates de début prévues. Ces lots sont ensuite sélectionnés et exécutés durant la période p selon leur ordre dans la liste de priorité. La charge de travail allouée à un lot de travail dans la liste de priorité est proportionnelle à sa durée sur la période simulée. Prenons comme exemple un lot de travail i qui est planifié de commencer à $t = p-1$ et finir à $t = p-1/4$ avec une charge de travail estimée de 30 *hommes.périodes*. Si sa date de début au plus tôt correspond à $t = p-1$ et sa charge de travail réelle est de 50 *hommes.périodes*, la charge qui lui sera affectée durant la période p est de 40 *hommes.périodes* et le lot sera toujours en cours d'exécution à la fin de cette période. Supposons maintenant que sa charge réelle est plutôt de 20 *hommes.périodes*, le lot i va finir dans ce cas à $t = p-1/2$ avec une allocation complète de sa charge réelle requise. Ces affectations sont toutefois soumises à la contrainte de disponibilité des ressources. En effet, si les ressources requises par le lot de travail i ne sont que partiellement disponibles, nous

allouons à ce lot uniquement la quantité disponible de ressources tout en respectant la proportionnalité des ressources. Si au moins une des ressources requises par le lot i est indisponible, le lot est alors retardé à une période future. Avant de passer au prochain lot de travail dans la liste de priorité, nous mettons à jour si nécessaire les dates de début au plus tôt des successeurs du lot i afin de garantir le respect des liens de précédence. Afin de maintenir la stabilité de l'échéancier, nous appliquons le principe du *Railway Scheduling* communément utilisé dans les approches d'ordonnancement réactif [Lambrechts et al., 2007; Van de Vonder et al., 2007a]. Ce principe consiste à interdire aux lots de travaux de commencer plus tôt que leurs dates de début prévues (selon le dernier échéancier généré).

Les étapes 1 à 3 de la méthode réactive présentée dans la Figure 5 sont répétées jusqu'à ce que tous les lots de travaux soient exécutés. Le coût simulé du projet correspond alors à la somme des quantités réelles de ressources externes utilisées sur les périodes simulées.

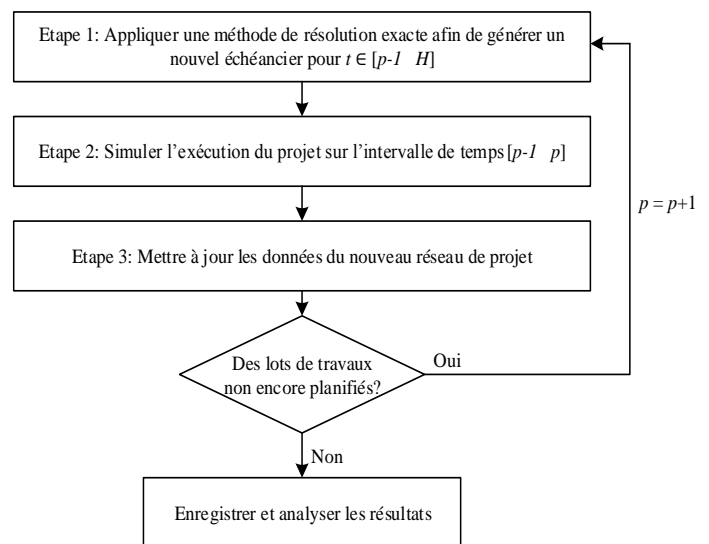


Figure 5. Diagramme conceptuel de l'approche de planification réactive

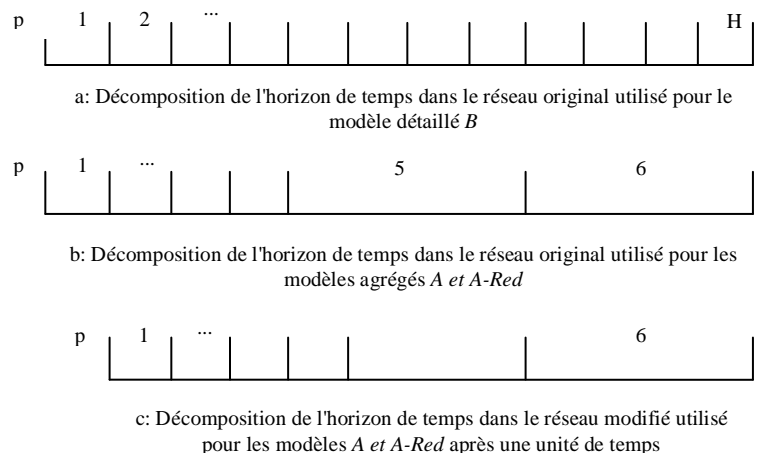


Figure 6. Illustration de la mise à jour du vecteur des durées des périodes

5.2 Résultats expérimentaux de la méthode réactive

L'approche de planification réactive a été codée sur Matlab R2013a interfacée avec CPLEX Optimization Studio 12.6.0.1 à travers l'utilisation de l'API de classe CPLEX sur Matlab. Les tests ont été effectués sur les mêmes instances décrites à la section 4. Les instances ayant un nombre de groupes de ressources réduit ($K = 3$) ont été toutefois éliminées étant donné la grande dispersion dans les résultats obtenus pour l'échéancier de base. De plus, nous nous intéressons ici au contexte des grands projets complexes d'ingénierie et de construction qui sont souvent caractérisés par un nombre important de groupes de ressources. Une limite de temps de 1000 secondes a été imposée pour la résolution CPLEX des modèles à chaque point de décision. Pour chacun des deux modèles (A et $A-Red$) et pour chaque instance de projet, 100 exécutions ont été simulées à partir des lois de distribution des charges de travail des lots qu'on suppose triangulaires. La distribution triangulaire d'un lot de travail est caractérisée par une valeur minimale égale à la moitié de la charge de travail estimée, une valeur maximale égale à la charge estimée multipliée par un facteur de 1,5 et finalement la valeur la plus probable de la distribution correspond à la charge estimée. La charge de travail estimée réfère à la valeur de la charge de travail utilisée pour générer l'échéancier de base. Concernant le modèle $A-Red$, nous avons appliqué le même pourcentage de réduction sur toutes les instances possédant un même nombre de groupes de ressources en considérant le pourcentage de réduction moyen sur ce groupe d'instances présenté dans le Tableau 5. Pour le groupe $K = 10$, nous avons donc appliqué un pourcentage de réduction de 18,9% et pour le groupe $K = 20$, nous avons appliqué un pourcentage de réduction de 20%.

Les deux modèles ont été testés sur les mêmes scénarios d'exécution pour chaque instance de projet. Un petit changement a été apporté aux instances de base en augmentant l'horizon de 20%, étant donné que l'horizon initial peut s'avérer insuffisant pour programmer les lots de travaux dont la charge réelle est supérieure à celle estimée au départ. La fonction objectif des modèles a aussi été adaptée en ajoutant au terme de coût du projet un terme qui pénalise fortement le dépassement de l'horizon initial. Les tests ont été effectués sur la même grille de calcul utilisée pour générer les échéanciers de base.

La mesure utilisée pour évaluer la robustesse des deux modèles est la suivante: $Var_X = (cost'_X - cost_X) / cost_X$. Elle correspond à la variation en pourcentage entre le coût simulé du projet $cost'_X$ et le coût estimé du projet $cost_X$ selon le modèle X . X réfère soit au modèle A ou au modèle $A-Red$.

Le Tableau 8 montre les résultats obtenus. Nous constatons l'influence notable des deux paramètres K et N sur la robustesse du modèle A . En effet, plus le nombre de groupes de ressources est important, plus le modèle est robuste. Le nombre de lots de travaux a quant à lui un effet inverse sur la robustesse du modèle. On note également la grande amélioration dans la robustesse du modèle quand on réduit les capacités des périodes agrégées. En effet, les variations de coût dans le modèle $A-Red$ sont acceptables à l'opposé du modèle A . Les résultats sont particulièrement satisfaisants pour le modèle $A-Red$ quand le nombre de groupes de ressources est grand ($K = 20$).

Tableau 8. Mesures de robustesse des modèles A et $A-Red$ en considérant les charges de travail des lots incertaines

	Modèle A		Modèle $A-Red$	
	Dépassement de coût (Var_A) moyen	Ecart-type du dépassement de coût	Dépassement de coût (Var_{A-Red}) moyen	Ecart-type du dépassement de coût
$K = 10$	80,7%	83,4%	10,8%	12,4%
$N = 10$	38,3%	22,9%	7,0%	8,8%
$N = 20$	64,0%	44,5%	11,9%	12,0%
$N = 50$	139,8%	113,8%	13,6%	15,0%
$K = 20$	33,0%	18,7%	4,8%	4,5%
$N = 10$	17,8%	7,0%	3,1%	4,5%
$N = 20$	27,5%	5,8%	4,8%	3,2%
$N = 50$	53,6%	16,9%	6,6%	4,9%

6 CONCLUSION

Ce papier nous permet de mesurer l'impact de planifier avec de l'information incomplète à moyen et long terme sur la précision et fiabilité des estimations de coût des projets. Un modèle RCCP où les premières périodes sont détaillées et celles plus éloignées sont agrégées pour faire face au manque d'informations a été comparé à un modèle RCCP où chaque période agrégée du premier modèle a été désagrégée en quatre périodes plus détaillées.

La comparaison des estimations de coût produites par les deux modèles a montré que les estimations du modèle agrégé sont très optimistes et peu réalistes comparées à celles du modèle détaillé notamment pour les instance caractérisées par un nombre réduit de groupes de ressources. Une approche de planification réactive a confirmé cette observation en simulant les coûts de réalisation des projets dans un contexte incertain. Cependant, réduire les capacités des ressources sur les périodes agrégées d'un pourcentage de 20% pour les instances caractérisées par un nombre important de groupes de ressources a permis de trouver des estimations beaucoup plus fiables et a amélioré grandement la robustesse du modèle agrégé. Cette observation permet de définir une politique simple d'application pour les planificateurs qui font face à un manque d'information important dans les phases préliminaires d'un projet.

Nous pouvons conclure que dans le cas des grands projets complexes d'ingénierie et de construction, nous pouvons, dans certains contextes, minimiser l'effort de planification en privilégiant un mode de planification agrégé à moyen et long terme ainsi qu'une planification itérative sur la base d'un horizon roulant. En effet, ce type de planification permet de faire face à l'incertitude et au manque d'informations tout en assurant un niveau de robustesse comparable à celui obtenu par une approche de planification plus détaillée. Cependant, une réduction adéquate des capacités des ressources sur les périodes agrégées doit être appliquée afin d'obtenir des estimations de coût plus réalistes. Dans le cas de nos expérimentations, une réduction de l'ordre de 20% est pertinente quand les périodes éloignées sont agrégées par un facteur de quatre. Dans le futur, il serait intéressant de chercher à identifier le pourcentage de réduction des capacités nécessaire dans le cas de projets réels. Certaines firmes d'ingénierie et de construction ont possiblement suffisamment de données empiriques pour permettre une telle étude.

7 REFERENCES

- AACE International, I. (2010). *AACE International recommended practice No. 27R-03 Schedule classification system*. Tiré de <http://www.aacei.org/non/rps/27R-03.pdf>
- Cherkaoui, K., Pellerin, R., Baptiste, P., Perrier, N. (2013, June 12-14). *Planification hiérarchique de projets EPCM*. Communication présentée à 10ème Conférence Internationale de Génie Industriel 2013, La Rochelle, France.
- De Boer, R. (1998). *Resource-constrained multi-project management, a hierarchical decision support system*. (Ph. D. thesis, University Of Twente, The Netherlands). Accessible par Google Scholar.
- Fündeling, C.-U., Trautmann, N. (2010). A priority-rule method for project scheduling with work-content constraints. *European Journal of Operational Research*, 203(3), 568-574.
- Gademann, N., Schutten, M. (2005). Linear-programming-based heuristics for project capacity planning. *Iie Transactions*, 37(2), 153-165. doi: 10.1080/07408170590885611
- Haït, A., Baydoun, G. (2012, December 10-13). *A new event-based MILP model for the resource-constrained project scheduling problem with variable intensity activity (RCPSVP)*. Communication présentée à Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Hong Kong.
- Hans, E. W. (2001). *Resource loading by branch-and-price techniques*. (Ph. D. thesis, University Of Twente, The Netherlands). Accessible par Google Scholar.
- Kis, T. (2005). A branch-and-cut algorithm for scheduling of projects with variable-intensity activities. *Mathematical programming*, 103(3), 515-539. doi: 0.1007/s10107-004-0551-6
- Lambrechts, O., Demeulemeester, E., Herroelen, W. (2007). *Exact and suboptimal reactive strategies for resource-constrained project scheduling with uncertain resource availabilities*. Katholic University Leuven.
- Naber, A., Kolisch, R. (2014). MIP Models for Resource-Constrained Project Scheduling with Flexible Resource Profiles. *European Journal of Operational Research*, 239(2), 335 - 348. doi: 10.1016/j.ejor.2014.05.036
- Pellerin, R. (1997). *Modèle d'ordonnement dynamique de projets de réfection*. (Ph.D., Ecole Polytechnique de Montréal (Canada)). Accessible par Dissertations & Theses @ Ecole Polytechnique de Montreal; ProQuest Dissertations & Theses A&I; ProQuest Dissertations & Theses Global.
- Van de Vonder, S., Ballestin, F., Demeulemeester, E., Herroelen, W. (2007a). Heuristic procedures for reactive project scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 52(1), 11-28. doi: 10.1016/j.cie.2006.10.002
- Van de Vonder, S., Demeulemeester, E., Herroelen, W. (2007b). A classification of predictive-reactive project scheduling procedures. *Journal of Scheduling*, 10(3), 195-207. doi: 10.1007/s10951-007-0011-2
- Wullink, G. (2005). *Resource loading under uncertainty*. (Ph. D. thesis, University of Twente, The Netherlands). Accessible par Google Scholar.