

# Résolution conjointe du problème d'ordonnancement et de transport des ressources dans un RCPSP avec une flotte hétérogène de véhicules

Marina Vinot<sup>1</sup>, Philippe Lacomme<sup>1</sup>, Aziz Moukrim<sup>2</sup>, Alain Quilliot<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Blaise Pascal, LIMOS UMR 6158, 63178 Aubière, France  
{placomme, quilliot, vinot}@isima.fr

<sup>2</sup> Sorbonne Universités, UTT de Compiègne, (Heudiasyc UMR CNRS 7253)  
{aziz.moukrim}@utc.fr

**Mots-clés :** RCPSP, GRASP×ELS, ordonnancement, transport

## 1 Introduction

Le problème présenté dans cet article est une extension du RCPSP, dans lesquelles le transport des ressources entre les activités est modélisé de façon explicite et repose sur l'utilisation de plusieurs véhicules. Le RCPSP avec transport (RCPSPT) fait partie des problèmes intégrés de production et de transport et la résolution conjointe de ces problèmes présente un enjeu majeur et un point clé dans une chaîne logistique, visant à coordonner l'ensemble de la chaîne. Il est apparu ces dernières années dans la littérature, plusieurs approches de résolution intégrées [1][2], cependant, dans la plupart des modèles présentés, les problèmes de production et de transport sont résolus itérativement. Le problème est donc une extension du RCPSP [3], avec une flotte hétérogène de véhicules  $T = \{1, \dots, v\}$  et une matrice des temps de déplacement entre les activités qui dépend du véhicule  $u$  et du volume  $x$  transporté ( $t_{ij}$  et  $e_{ij}$ ).

## 2 Définition du problème

Le problème de transport lié au RCPSPT consiste à déterminer, et à ordonnancer des opérations de transport afin de constituer des tournées. La tournée d'un véhicule  $u$  est composée d'opérations de transport à charge, de durée  $t_{ij}$  avec  $x$  unités de ressources et de transport à vide, de durée  $e_{ij}$  entre l'activité  $i$  et  $j$ . Selon la classification proposée par [4], le véhicule est une ressource du 2<sup>ème</sup> niveau puisqu'il réalise le transport de ressources du 1<sup>er</sup> niveau (ressources du RCPSP). Dans une solution, une activité est définie par une date de début  $S_j$  et une date de fin  $C_j = S_j + p_j$  avec une date de début supérieure à la date d'arrivée de la dernière ressource nécessaire pour l'activité considérée. Chaque opération de transport  $T_{(i,j,u,x)} = (P_{(i,j,u,x)}, D_{(i,j,u,x)})$  entre une activité  $i$  et  $j$  se compose d'une opération de collecte  $P_{(i,j,u,x)}$  des ressources au niveau de l'activité  $i$  (on parle en général de pickup) et d'une opération de livraison des ressources au niveau de l'activité  $j$  notée  $D_{(i,j,u,x)}$ . Une opération  $P_{(i,j,u,x)}$  ou  $D_{(i,j,u,x)}$  se définit par: 1) Une date de début:  $B_{(i,j,u,x)}$  ou  $A_{(i,j,u,x)}$ ; 2) Une quantité de ressource à collecter ou livrer:  $x$ ; 3) Un numéro de véhicule affecté à cette opération:  $u$ . D'après les hypothèses du problème, la durée des opérations de collecte (pickup) est nulle, on peut donc considérer qu'un déplacement à charge  $T_{(i,j,u,x)}$  d'un véhicule, est défini par un couple origine/destination avec  $B_{(i,j,u,x)}$  comme date de début au plus tôt du déplacement. Pour des raisons similaires, on peut considérer que la date de début de l'opération de livraison  $A_{(i,j,u,x)}$  du véhicule au niveau de l'activité  $j$  définit la date de fin au plus tôt du déplacement  $T_{(i,j,u,x)}$ .

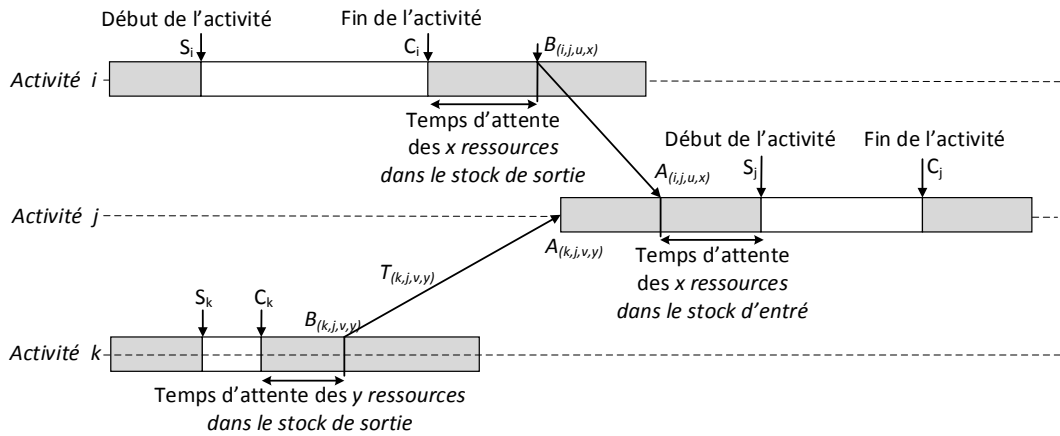


FIG. 1 – Intégration du transport et de l'ordonnancement

La date d'arrivée du dernier véhicule au niveau de l'activité  $j$ , est une borne inférieure de la date de début au plus tôt  $S_j$  de l'activité  $j$ . L'intervalle de temps entre le début d'une activité  $S_j$  et  $A_{(i,j,u,x)}$  définit un temps d'attente des  $x$  ressources dans un stock d'entrée devant l'activité  $j$  (Figure 1). Ce type d'attente apparaît aussi dans les stocks de sortie et se visualise comme la différence entre la date de fin d'une activité  $C_i$  et la date de départ  $B_{(i,j,u,x)}$  d'un véhicule depuis cette activité.

Une solution se compose d'une solution de l'ordonnancement (Fig. 2) et par un ensemble de routes définissant la solution du transport.

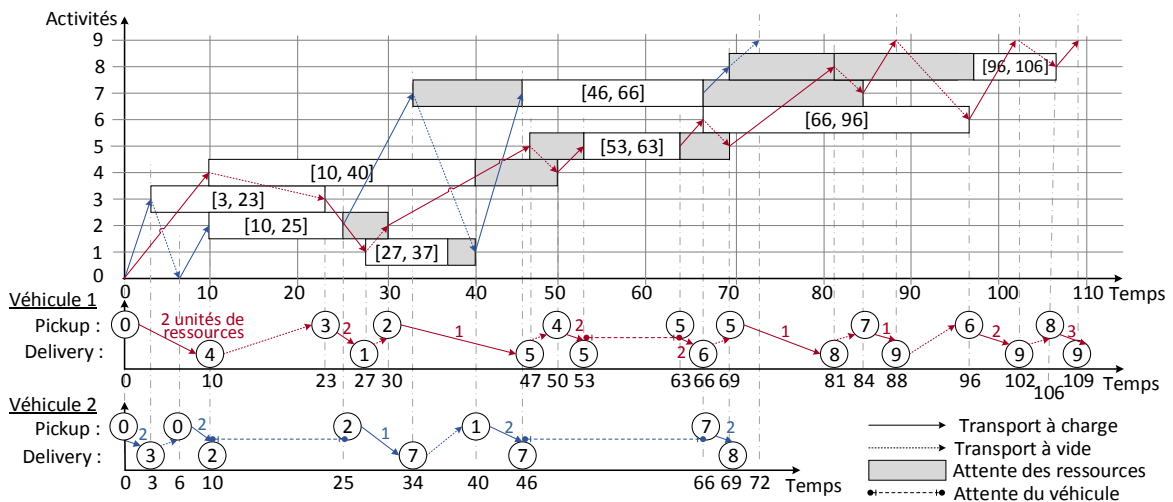


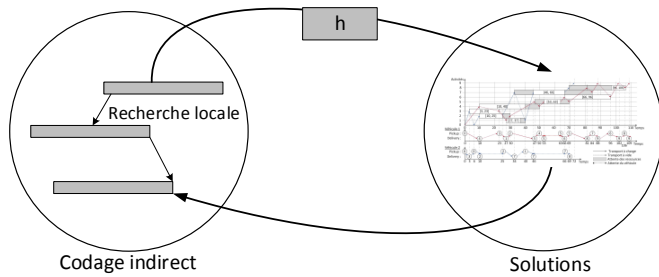
FIG. 2 – Une solution du RCPSP avec transport

Sur la Figure (2), l'activité 4 est ordonnancée de la date 10 à 40 et la date 40 correspond au moment où les ressources utilisées par l'activité 4 sont à nouveau disponibles et susceptibles d'être chargées par un véhicule. Le véhicule 1 est affecté au transport de 2 unités de ressources de l'activité 0 vers l'activité 4 et son premier déplacement correspond bien à une opération de type Pickup/Delivery. Il est important de remarquer que les déplacements à charge des véhicules sont séparés par des déplacements à vides, ou des temps d'attente, qui font partie intégrante de la solution.

### 3 Proposition de modélisation et de résolution du problème

#### 3.1 Représentation indirecte d'une solution

Les approches par codage indirect (Fig. 3) sont couramment utilisées à la fois en ordonnancement (le vecteur de Bierwirth en Job-Shop) et en transport où elles sont regroupées sous le terme générique Split.



Une approche similaire peut être définie pour ce problème intégrée en considérant un ordre des activités permettant à la fois de définir une solution de l'ordonnancement et du transport.

FIG. 3 – Représentation indirecte

### 3.2 Définition d'une solution via un codage indirect

La spécificité du problème réside dans le fait que le codage doit permettre la définition conjointe d'une solution d'ordonnancement et de transport. Une résolution spécifique basée sur 4 points clés est nécessaire (Fig. 4):

- résoudre dans un premier temps un problème de flot exploitant ainsi des approches efficaces [3];
- définir des opérations de transport basées sur le flot obtenu précédemment ;
- ordonner les opérations de transport pour définir un tour géant ;
- créer une nouvelle procédure Split qui permet un découpage optimal du tour géant en modélisant à la fois les contraintes liées à la flotte de véhicules mais aussi à l'état des activités.

Pour des raisons d'efficacité, les problèmes (à l'exception de la procédure Split) sont résolus de manière heuristique et l'exploration de l'espace de recherche se fait uniquement par un parcours de l'espace de tous les ordres possibles des activités.

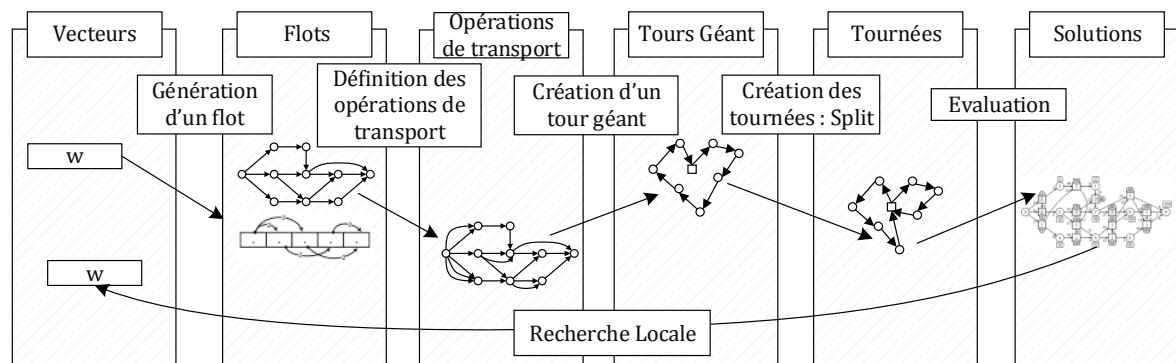


FIG. 4 – Principe de projection d'un espace à l'autre

Le passage par ces quatre étapes intermédiaires est dû à la nature particulière du problème à résoudre. En effet, la définition des opérations de transport n'est effectivement connue qu'après la résolution d'un problème de flot, dans le meilleur des cas, ce qui augmente considérablement la combinatoire du problème à résoudre. D'autre part, comme les deux problèmes sont résolus de manière conjointe, la procédure split fait appel à des labels spécifiques, qui permettent de prendre en compte à la fois l'état de la flotte (positions et dates de disponibilité des véhicules) mais aussi la dynamique des activités. La date de début d'un déplacement dépend à la fois de la date de fin du déplacement précédent, mais aussi de la date de disponibilité des ressources sur une activité.

### 3.3 Intégration des deux problèmes dans un graphe disjonctif

Il est possible d'étendre les graphes disjonctifs définis pour le job-shop ou le flow-shop avec transport et de modéliser les activités sous la forme de nœud et les opérations de transport sous la forme de nœud de nature différente symbolisée par des carrés sur la figure 4. Par rapport à un problème de job-shop avec transport, les activités ne sont pas en disjonction les unes avec les autres, mais les opérations de transport se voient affectées un numéro de véhicule et font l'objet de disjonctions entre transport affectés au même véhicule.

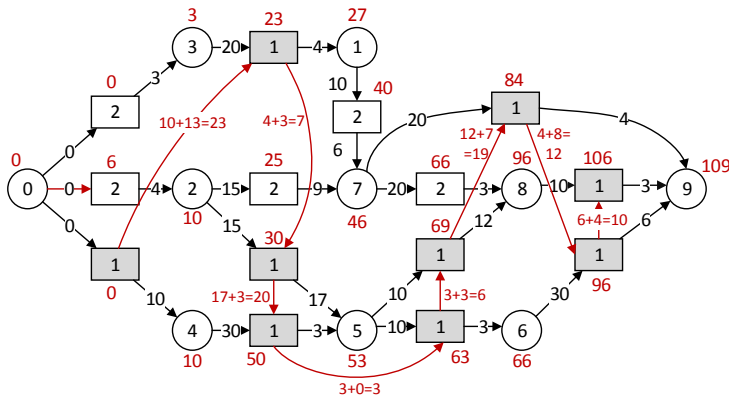


FIG. 5 – Une solution du RCPSP avec transport

De nombreux résultats connus dans le cadre du job-shop ou du flow-shop avec transport se généralisent à ce graphe et en particulier la notion de bloc sur le chemin critique qui permet de définir des recherches locales efficaces.

L'ensemble de tous ces éléments permet de définir une métaheuristique hybride, de type GRASP×ELS.

### 3.4 Tests numériques

Les performances de la méthode ont été évaluées sur 9 instances (composées de 10 activités avec 2 véhicules) et comparées aux résultats obtenus avec Cplex.

Instances	Nb. variables	Nb. contraintes	Meilleure Solution Cplex	Borne inf. Cplex	TT	Meilleure Solution GRAP×ELS	TT	Gap (%)
1	1	98095	109*	109*	13h	109*	2s	0
	2	98095	148*	148*	24j	148*	4s	0
	3	98095	235	226	30j	240	2s	2
2	1	90869	109*	109*	12h	109*	2s	0
	2	90869	148*	148*	3j	148*	3s	0
	3	90869	235*	235*	29j	251	3s	6
3	1	83653	109*	109*	9h	109*	2s	0
	2	83653	156*	156*	3j	156*	3s	0
	3	83653	274	192	30j	274	3s	0

TAB. 1 – Résultats numériques sur de petites instances

## 4 Conclusions et perspectives

Nous nous intéressons à la résolution conjointe d'un problème d'ordonnancement de type RCPSP et d'un problème de transport. L'approche proposée est une approche indirecte basée sur une nouvelle méthode Split. Les résultats obtenus montrent que la méthode est très performante et permet d'obtenir de très bonnes solutions en quelques secondes alors que l'obtention d'une solution optimale via Cplex demande plusieurs jours de temps de calcul.

## Références

- [1] Chen Z.L. Integrated Production and Outbound Distribution Scheduling: Review and Extensions, *Oper. Res.* 58(1): 130-148, 2010.
- [2] Sarmiento A. M, Nagi R. A review of integrated analysis of production-distribution systems ; *IIE Trans.* 31, 1061–1074. 1999.
- [3] Artigues C. P. Michelon and S. Reusser. Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling ; *Eu. Journal. of Op. Res.* 149, 249-267. 2003.
- [4] Krüger, D. and A. Scholl. Managing and modelling general resource transfers in (multi-) project scheduling. *OR Spectrum.* 32(2). 369-394. 2010.
- [5] Prins C., P. Lacomme and C. Prodhon. Order-first split-second methods for vehicle routing problems: A review. *Transportation Research Part C: emerging technologies.* 40. 179-200. 2014.