

ORDONNANCEMENT ROBUSTE AUX RISQUES PROJETS

CABARBAYE André 1 - LAULHERET Roland 2

Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) (1) & (2)

18, avenue Edouard Belin - 31401 Toulouse

Tél. : 05 61 28 27 41 – Fax : 05 61 28 22 31 – Mail : andre.cabarbaye@cnes.fr (1)

Tél. : 05 61 27 47 19 – Fax : 05 61 28 22 31 – Mail : roland.laulheret@cnes.fr (2)

CAB INNOVATION (1)

3, rue de la Coquille - 31500 Toulouse

Tél. : 05 61 54 68 08 – Fax : 05 61 54 33 32 – Mail : andre.cabarbaye@cabinnovation.fr (1)

Web : www.cabinnovation.fr

Résumé :

Cet article présente une méthode d'élaboration d'ordonnements robustes aux aléas identifiés au cours des analyses de risques « projets ». L'ordonnement résulte d'une optimisation réalisée à partir de résultats de simulation de type Monte-Carlo dans laquelle les risques relatifs à des durées ou coûts de tâches élémentaires sont caractérisés par des lois de probabilité. Supportée par un outil de la société CAB INNOVATION, cette optimisation peut être menée selon différents critères tels que la maximisation des revenus à échéance (ensembles des gains et coûts associés à l'ordonnement ramené à T_0 par un taux d'intérêt) tout en respectant des contraintes de précédence entre tâches, de ressources partagées (capables de mener un nombre limité de tâches simultanément) ou de dates de fin de tâche au plus tard.

Abstract :

This article presents a method of robust scheduling development against the risks identified during analyses of risks "projects". Scheduling results from an optimisation carried out starting from results of simulation of the type Monte-Carlo in which the risks relative to durations or costs of elementary tasks are characterised by laws of probability. Supported by a tool of the CAB INNOVATION company, this optimisation can be carried out according to various criteria such as the maximisation of the incomes in the term (sets of the profits and costs associated with the tasks brought back to T_0 by an interest rate) while respecting constraints of precedence between tasks, of shared resources (able to carry out a limited number of tasks simultaneously) or completion dates of task at the latest.

Mots clés : Risques projets - Ordonnement robuste - Algorithmes Génétiques

Keywords : risks "projects" - robust scheduling - Genetic Algorithms

1 – Introduction

Depuis quelques années, la maîtrise des « risques projets » a su trouver sa place dans les colloques traitant de Qualité et de Gestion de Projet, comme l'attestent les nombreuses communications s'y rapportant. Associés au projet et non pas au produit, ces risques se différencient des risques techniques relatifs à la fiabilité, la disponibilité ou la sécurité, mais leurs conséquences n'en sont pas moins néfastes pour l'entreprise dont l'action, particulièrement contrainte sur les plans calendaire et financier, est perpétuellement soumise à aléas.

Ainsi, de nombreuses méthodes d'identification, d'évaluation et de traitement des risques, similaires à celles utilisées en Sûreté de Fonctionnement, sont aujourd'hui proposées pour limiter les dérives et surcoûts pouvant être engendrés par chacune des tâches d'un projet ; la faisabilité de ce dernier étant supposée acquise à l'issue d'études préliminaires. Le plus souvent fondées sur l'emploi de diverses « Check lists », ces analyses aboutissent généralement à des synthèses présentées sous la forme de listes de risques hiérarchisés auxquels sont associées des recommandations.

Mais l'aide apportée au décideur reste limitée si celui-ci n'a pas une vision claire de la globalité des conséquences des événements redoutés identifiés et des décisions à prendre pour y faire face. Or, l'impact d'une dérive calendaire ponctuelle, même située sur le chemin critique, peut éventuellement disparaître par un réajustement des tâches ou par l'occurrence d'un second aléa. Sur un projet d'une certaine durée (4 à 5 ans au minimum dans le domaine spatial), celui d'un surcoût dépend significativement de l'instant où il survient par le simple jeu des taux d'intérêt. En outre, la décision porte le plus souvent sur de nouvelles actions qui ont elles-mêmes un coût et une durée, et sont également soumises à aléas.

C'est pourquoi l'ordonnancement robuste, dans un environnement généralement beaucoup moins déterministe que celui considéré par les hypothèses des modèles classiques de résolution, est devenue une problématique prégnante dans la communauté des chercheurs en organisation et conduite d'activité industrielle. Ainsi, certains travaux proposent de pallier l'aléa par la recherche a priori d'une famille de solutions permettant de réagir aux événements imprévus apparaissant durant l'exécution du projet sans nécessiter la remise en cause des calculs d'ordonnancement déjà effectués [Briand 03]. Bien que la régénération « en ligne » d'un ordonnancement, quand survient l'aléa, ne soulève aucune difficulté de réalisation à nos yeux mais est souvent contrainte par des aspects contractuels entre partenaires multiples, il nous apparaît pertinent d'exploiter les résultats des analyses de « risques projets » pour tenter d'élaborer un ordonnancement de tâches intrinsèquement robuste à l'ensemble des aléas identifiés.

Cet article présente une méthode permettant de générer de tels ordonnancements. Les aléas identifiés au cours des analyses de risques « projets », relatifs à des durées ou coûts de tâches élémentaires, étant caractérisés par diverses lois de probabilité, l'ordonnancement robuste est le fruit d'une optimisation réalisée à partir de résultats de simulation de type Monte-Carlo. Cette méthode est supportée par l'outil CABPLAN de la société CAB INNOVATION.

2 – L'outil CABPLAN

Basé sur une méthode d'optimisation hybride associant Algorithmes Génétiques [Goldberg 94] [Renders 95] et Simplexe non linéaire (algorithme de Nelder Mead), l'outil CABPLAN permet de générer un ordonnancement selon différents critères, tout en respectant certaines contraintes ; ces dernières pouvant concerner des règles de précedence entre tâches, de ressources partagées (limitant à une certaine valeur le nombre de tâches pouvant être menées simultanément) ou de dates de fin de tâche au plus tard, comme l'illustre la figure 1.

Tâches		Antériorité		Ressources communes				Achèvement au plus tard	Durée		Début à date fixe	Au plus tôt	Au plus tard	Début	Fin	Coût en début de tâche	Coût / durée	Coût total à T0	Gain en fin de tâche	Gain total à T0			
N°	Nom	N° Tache	+	C	N° Tache	+	Nb max	C	Date(jr)	C	(jr)	marge	Date(jr)		Date(jr)	Date(jr)	Date(jr)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)		
1	Tâche 1	10			0	2	5	20	12	15	9	3	0		0	150	5			0	158,268	0	
2	Tâche 2	1	3		0								0	50	6	200	0	80	6		117,48	0	
3	Tâche 3	3	6		0								0	125	2			108	188	45	3	232,887	0
4	Tâche 4	3	6		0								0	984	1111			984	1111	12	4	505,751	0
5	Tâche 5				0	8	9	11	20	6	24	2	0	215				466	681	50	25	5337,6	0
6	Tâche 6	5			0								0	302	1			681	984	4	32	9495,22	0
7	Tâche 7				0								0	459		250		709	709	5	2	892,43	0
8	Tâche 8	7			0								0	76				709	785	78	3	297,028	5000
9	Tâche 9				0								0	89		318		318	407	45	4	396,633	0
10	Tâche 10				0								0	25		0		0	25	13	2	62,9084	0
11	Tâche 11				0								0	46				939	985	2	7	322,658	0
12	Tâche 12				0	3	5	8	4				0	78				733	811	6	3	238,054	0
13	Tâche 13	9			0	10							0	13	1			407	421	3	8	106,719	0
14	Tâche 14				0								0	46				951	997	7	9	418,694	0
15	Tâche 15	13			0	11	10	14					0	78				421	499	89	4	393,89	15000
16	Tâche 16	2	5		0								0	54	2			926	982	2	3	163,082	0
17	Tâche 17	2	1		0								0	69	3			885	957	4	7	483,969	0
18	Tâche 18	16			0								0	12	1			1075	1088	6	12	148,388	0
19	Tâche 19	18	15		0	8	9						0	78				1185	1273	78	1	143,012	0
20	Tâche 20				0								0	150	3			525	675	2	1	150,211	0
21	Tâche 21	3	6		0	5	6	7	9	11		2	0	29	3			984	1016	3	3	89,3927	0
22	Tâche 22	3			0								0	69	1			790	860	5	8	553,626	0
23	Tâche 23	23	21		0								0	31	3			1016	1050	7	9	284,336	0
24	Tâche 24	23			0	12	14						0	49	1			1057	1107	6	50	2446,17	0
25	Tâche 25	24			0								0	53	4			1111	1168	45	7	407,684	0
26	Tâche 26	25			0								0	100				1171	1271	25	9	914,479	0
+	Fin				0								0	1300	0			1273	1273			15000	12444,6

Fin de la dernière tâche : 1273 Coût : 24771 Gain : 30842

Revenu global à T0 : 6071

Taux d'intérêt : 5,50%

Figure 1. Formalisme utilisé par l'outil CABPLAN

Ainsi dans cet exemple, la tâche 2 ne peut débuter qu'après la réalisation complète des tâches 1 et 3 et ne peut pas être concomitante avec plus de 2 tâches parmi les tâches 1, 5, 20, 12, 15 et 9 pour lesquelles certaines ressources matérielles ou humaines sont partagées. Ces ressources n'ont pas besoin d'être explicitées et chaque condition peut n'être exprimée qu'une fois (si la tâche i ne peut pas se dérouler pendant les tâches j , la tâche j ne peut pas se dérouler pendant la tâche i). Cette formulation relativement simple permet de définir la plupart des contraintes résultant de l'utilisation de plusieurs ressources affectées à une même tâche (la tâche 20 partage une ressource avec la tâche 1 et une autre avec la tâche 5). Dans les cas où cela ne s'avère pas possible, quand par exemple trois ressources ne sont utilisées que par deux tâches, une dichotomie des tâches peut être effectuée suivant les ressources utilisées. Enfin dans cet exemple, la tâche 3 doit être impérativement achevée à la date $t = 200$ jours après T_0 , date du commencement de la première tâche de l'ordonnancement.

Le début de chacune des tâches peut être choisi au plus tôt ou au plus tard, à date fixe, ou laissé à l'appréciation de l'outil, en tant que paramètre de l'optimisation. Le nombre de tâches de l'ordonnancement n'est pas limité (26 dans l'exemple), mais celui des tâches laissées à l'appréciation de l'outil (17 dans l'exemple) ne peut augmenter indéfiniment en raison des limites mêmes des techniques d'optimisation employées (perte significative d'efficacité au delà de 50 tâches).

Outre la satisfaction des contraintes, l'optimisation peut porter sur la durée globale de l'ordonnancement ou sur un critère plus pertinent tel que la maximisation du revenu ramené à T_0 par un taux d'intérêt. Aussi peut-on affecter à chaque tâche un coût initial (un échéancier de différents coûts d'approvisionnement pouvant être ramené à un coût unique au démarrage) ainsi qu'un coût proportionnel à la durée. De même, l'achèvement d'une tâche ou de l'ordonnancement complet peut apporter un gain ; les gains et les coûts étant ramenés à T_0 par application du taux d'intérêt choisi.

Traitées par l'outil, les contraintes non satisfaites de la table disparaissent progressivement et l'ordonnancement évolue selon le critère choisi. Il est à noter que la recherche de l'optimum s'avère plus efficace avec le critère de maximisation du revenu qu'avec celui de la durée globale de l'ordonnancement. En effet, chaque variation de date de début de tâche influence le résultat final avec ce premier critère, ce qui n'est pas le cas avec le second (limité aux seules tâches placées momentanément sur le chemin critique). Une fonction de dessin permet de générer le diagramme PERT correspondant à la table afin d'en faciliter la lecture des résultats (figure 2).

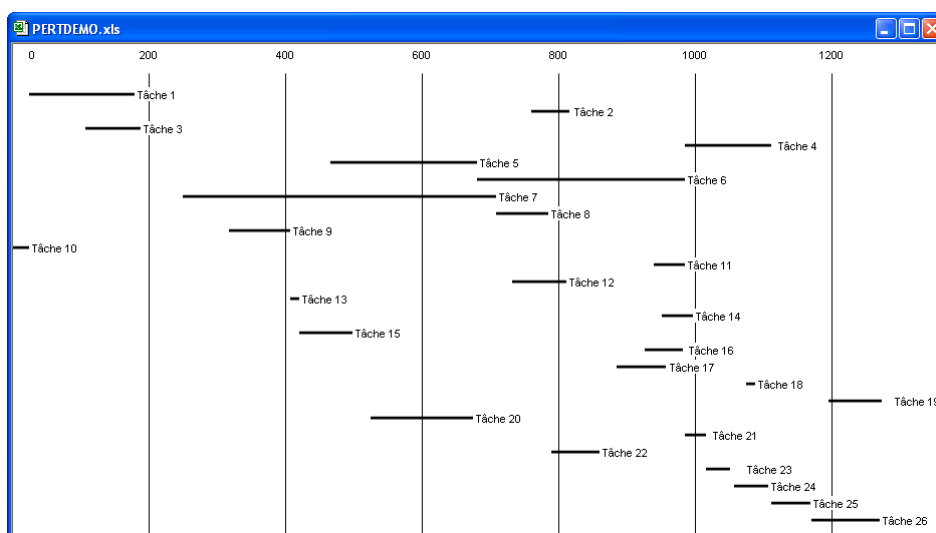


Figure 2. Diagramme PERT correspondant à la table

3 – Simulation d'un diagramme PERT

A partir d'un diagramme « PERT », l'impact d'une dérive unitaire sur la durée globale du projet est relativement simple à évaluer, en remplaçant les dates de début de tâches par un majorant entre les dates prévues et celles résultant de la satisfaction des contraintes de précédence. La modification de la durée ou d'un coût relatif à une tâche se traduit alors immédiatement par une modification du PERT et des coûts associés, avec l'apparition d'éventuelles contraintes de ressources ou de date au plus tard non satisfaites. Ainsi un chef de projet peut à tout moment évaluer l'impact d'un aléa, en termes de coût et délai sur la

totalité du développement, afin d'évaluer l'opportunité de diverses actions de sécurisation (séduisantes au niveau élémentaire, certaines d'entre elles pouvant s'avérer globalement contre productives). Il peut également régénérer complètement le PERT quand l'aléa survient pour tenter d'éliminer ses conséquences par un réajustement des tâches non encore réalisées.

Par ailleurs, la simulation de type Monte-Carlo d'un diagramme PERT peut être utilisée pour obtenir des résultats financiers ou calendaires sous la forme de distributions statistiques (figure 3) afin de crédibiliser les estimations globales du projet, de la même manière que sont effectuées les analyses pires cas en Sûreté de Fonctionnement pour s'assurer que des paramètres techniques jugés critiques restent dans leur plage de tolérance avec une probabilité acceptable. Les aléas identifiés au cours des analyses de risques, relatifs à des durées ou coûts de tâches élémentaires, sont alors caractérisés par diverses lois de probabilité généralement simples (uniforme, triangulaire, normale), ou plus complexes si nécessaire.

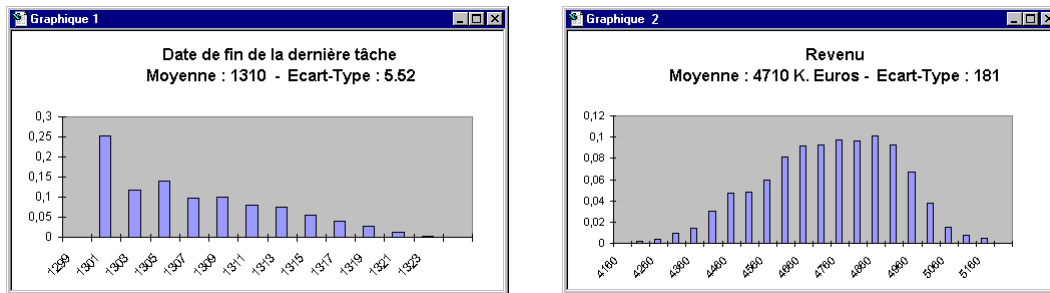


Figure 3. Distribution statistique de résultats

4 – Génération d'un ordonnancement robuste

Les aléas étant, à nouveau, caractérisés par des lois de probabilités, l'optimisation ne s'appuie plus sur des caractéristiques déterministes de chacune des solutions candidates mais sur des résultats de simulation de type Monte-Carlo, tel que la valeur moyenne des revenus à 0 ou 1 sigma.

Différent de celui obtenu précédemment et naturellement plus margé, l'ordonnancement obtenu devient ainsi robuste car il maximise le revenu moyen obtenu pour l'ensemble des cas simulés.

La durée du traitement est cependant beaucoup plus longue et est, en première approximation, multipliée par le nombre de cas de simulation (passage de quelques minutes pour l'exemple de la figure 1 à quelques heures pour 60 cas, et à quelques dizaines d'heures pour 600 cas, etc..) ; Ce nombre de cas conditionnant directement la précision du résultat sur lequel s'effectue l'optimisation (bornes de l'intervalle de confiance inversement proportionnelles à \sqrt{N}).

C'est pourquoi une réflexion a été menée pour améliorer le couplage entre optimisation et évaluation stochastiques afin de diminuer la durée globale des traitements. Celle-ci a abouti à une méthode originale consistant à faire varier judicieusement le nombre de simulations de chaque évaluation, en exploitant les résultats d'une évaluation grossière préalable, limitée à quelques dizaines de cas.

Illustrée par la figure 4, le principe de base de cette technique consiste à accorder à chaque solution candidate une même probabilité de rejet inopportun, ce qui se traduit par une condition entre les valeurs respectives N_i et N_j du nombre de simulations à réaliser pour évaluer deux candidats i et j en fonction de la moyenne et de la variance des résultats obtenus à l'issue de l'évaluation grossière limitée à un nombre réduit N_0 de simulations. Cette condition résulte directement de l'application du théorème central limite.

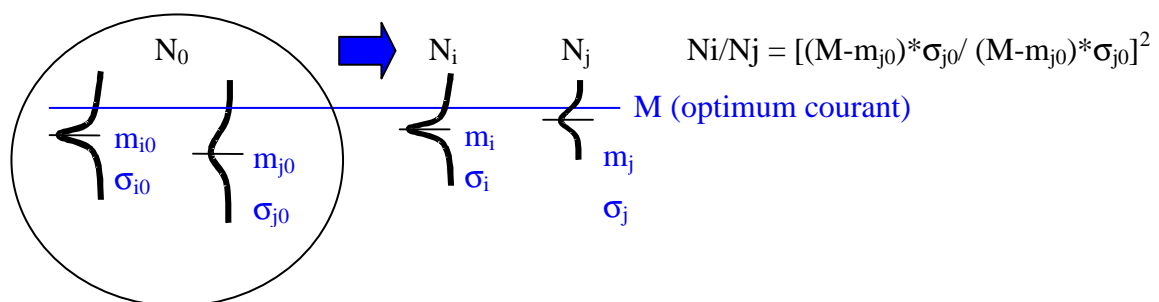


Figure 4. Principe d'évaluation

Testée sur un cas test [Beghin 04], cette amélioration du couplage permet de diminuer la durée de traitement dans un rapport 5 environ.

5 - Conclusion

Parallèlement aux techniques de Sûreté de Fonctionnement appliquées aux produits, les techniques d'analyse des « risques projets » se diffusent actuellement dans les entreprises pour mieux maîtriser les risques calendaires et financiers ; les premiers étant étroitement liés aux seconds soit directement par les pénalités et retards de paiement occasionnés soit indirectement via la perte de crédibilité et d'image engendrée par les dépassements observés sur certains développements.

L'ordonnancement des tâches constitue un domaine d'action privilégié où la maîtrise des « risques projets » peut s'exercer. Mais le chef de projet a souvent du mal à faire le lien entre les risques identifiés aux cours des analyses, leurs conséquences macroscopiques, et l'impact réel de certaines recommandations. Il importe alors que les outils d'ordonnancement disponibles ne se limitent pas à une simple aide à la mise en forme de diagramme PERT, mais qu'ils aient une réelle capacité d'élaboration, d'évaluation et de simulation, tant en phase de définition que quand l'aléa survient.

Par ailleurs, l'élaboration d'un ordonnancement intrinsèquement robuste aux « risques projets », s'appuyant sur des résultats de simulation stochastique prenant en compte l'ensemble des aléas identifiés, nous apparaît comme un moyen efficace de maîtriser les risques en exploitant au mieux les résultats des analyses.

Les traitements correspondants sont sensiblement plus longs que ceux réalisés dans un environnement déterministe, mais peuvent être significativement réduits par des améliorations algorithmiques.

REFERENCES :

[Blazewicz] Blazewicz J. , Ecker K. , Schmidt G. , Weglarz J. , *Scheduling in Computer and Manufacturing Systems*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1993.

[Goldberg] David E. Goldberg, *Algorithmes Génétiques, Exploration optimisation et apprentissage automatique*, Addison-Wesley, 1994.

[Lereno] Lereno E. , Morello B. , Baptiste P. , *Système d'aide au paramétrage d'un logiciel d'ordonnancement*, 3e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'01), Troyes (France), 25-27 avril 2001.

[Pinedo] Pinedo M.L. , *Scheduling : theory, algorithms and systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.

[Renders] Renders J-M. , *Algorithmes génétiques et réseaux de neurone*, Hermes, 1995

[Schiex] Schiex T. , Fargier H. , Verfaillie G. , *Problèmes de satisfaction de contraintes valués*. Revue d'Intelligence Artificielle, 11(3):339-373, 1997.

[Briand] Briand C., Hoang Trung La, Erschler J. , *Une approche pour l'ordonnancement robuste de tâches sur une machine*, 4e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation - (MOSIM'03) Toulouse (France), 23 au 25 avril 2003.

[Beghin] Beghin B., P. Baqué, A. Cabarbaye - *Couplage efficace entre Optimisation et Simulation stochastique - Application à la maintenance optimale d'une constellation de satellites* - Lambdamu 14, BOURGES, 12 - 14 octobre 2004