

Ordonnancement robuste et décision dans l'incertain

4^{ème} Conférence Annuelle d'Ingénierie Système
« Efficacité des entreprises et satisfaction des clients »
Centre de Congrès Pierre Baudis, TOULOUSE, 2-4 mai 2006

A. Cabarbaye
Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)
18, avenue Edouard Belin
31401 Toulouse
andre.cabarbaye@cnes.fr /
CAB INNOVATION
3, rue de la Coquille - 31500 Toulouse
andre.cabarbaye@cabinnovation.fr

J. Faure
Centre National d'Etudes
Spatiales (CNES)
18, avenue Edouard Belin
31401 Toulouse
julien.faure@cnes.fr

R. Laulheret
Centre National d'Etudes
Spatiales (CNES)
18, avenue Edouard Belin
31401 Toulouse
roland.laulheret@cnes.fr

Résumé. Afin d'enrichir la démarche générale de la maîtrise des risques projets et de fiabiliser les processus de fabrication, cette communication présente une technique d'ordonnancement bien adaptée à la prise en compte de l'aléa (pannes, dérive, surcoût, résultat imprévu, évolution d'environnement, défaillance de partenaire...). Basée sur une méthode couplant optimisation et simulation stochastique, elle permet de générer des ordonnancements robustes et cherche à couvrir la problématique plus générale de la prise de décision dans l'incertain quand l'aléa prédomine (stratégie d'entreprise à long terme, choix d'implantation d'usine, gestion de crise...).

INTRODUCTION

Depuis quelques années, la maîtrise des « risques projets » s'est progressivement imposée dans tous les domaines d'ingénierie afin de limiter les dérives et surcoûts pouvant être engendrés par chacune des tâches élémentaires d'un projet. A partir de diverses « Check lists » portant notamment sur la maturité des technologies utilisées ou sur l'expérience et la crédibilité des intervenants, les différentes tâches sont analysées afin d'identifier puis d'évaluer les risques et proposer des recommandations pour les maîtriser. 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 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 tel que ceux du 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 soumises à aléas.

De même dans les domaines de l'intégration et de la fabrication en série, il importe de maîtriser l'aléa susceptible de bloquer ou de bouleverser un agencement de tâches élémentaires harmonieusement planifiées pour assurer les meilleurs compromis entre les coûts et les délais de réalisation.

C'est pourquoi, l'ordonnancement robuste est aujourd'hui devenu une problématique prégnante (Pinedo 1995) (Lereno 2001) (Briand 2003) (Esswein 2003) (Vidal 2003). Cette robustesse peut être acquise par la régénération en ligne de l'ordonnancement quand survient l'aléa, si les contraintes temporelles ou contractuelles l'autorisent, ou recherchée a priori par une approche dite « proactive » consistant à élaborer un ordonnancement intrinsèquement robuste à l'ensemble des aléas préalablement identifiés. Mais quand l'incertitude est généralisée, l'ordonnancement n'a plus grand sens et se limite alors à de la prise de décision dans l'incertain, concernant la réalisation d'un nombre restreint de tâches censées nous rapprocher au mieux d'un objectif recherché.

Afin de résoudre des problématiques rencontrées sur des projets du domaine spatial, une méthode de génération d'ordonnements robustes (Cabarbaye 2005) et d'aide à la décision en environnement aléatoire a été développée. Celle-ci a été implantée dans un outil d'ordonnancement (Cabplan).

ORDONNANCEMENT DETERMINISTE

Basé sur une méthode d'optimisation hybride associant Algorithmes Génétiques (Goldberg 1994) (Renders 1995) (Cabarbaye 2003), Evolution Différentielle (Feoktistov 2004), et Simplexe non linéaire (algorithme de Nelder Mead), cet outil d'ordonnancement se présente sous la forme d'une feuille de tableur Excel, comme celle présentée en figure 1.

L'ordonnancement peut être généré selon différents critères tels que la maximisation des revenus à échéance (gains moins coûts associés à l'ordonnancement ramené à T0 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. Ainsi dans l'exemple présenté, 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 des ressources sont partagées. Ces ressources n'ont pas besoin d'être explicitées et il n'est pas nécessaire

d'exprimer plusieurs fois les mêmes contraintes (si la tâche i contraint la tâche j, la tâche j contraint la tâche i). La tâche 3 doit être impérativement achevée 200 jours après le commencement de la première tâche. 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 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 (limité à 150 par l'outil).

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	
N°	Nom	N° Tâche	+	C	N° Tâche	+	Nb max	C	Date(jr)	C	(jr)	marge	Date(jr)		Date(jr)	Date(jr)	Date(jr)	Date(jr)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)		
1	Tâche 1	10		0	2	5	20	12	15	9	3	0	0	150	5	Oui	Non	25	180	10	1	158,268	0	0	0	0	0	0			
2	Tâche 2	1	3	0								0	50	6	Non	Non	802	858	20	2	117,371	0	0	0	0	0	0	0			
3	Tâche 3			0								200	80		Non	Non	98	178	45	3	282,953	0	0	0	0	0	0	0			
4	Tâche 4	3	6	0								0	125	2	Oui	Non	934	1061	12	4	505,828	0	0	0	0	0	0	0			
5	Tâche 5			0	8	9	11	20	6	24	2	0	215		Non	Non	416	631	50	25	5337,95	0	0	0	0	0	0	0			
6	Tâche 6	5		0								0	302	1	Oui	Non	631	934	4	32	9455,25	0	0	0	0	0	0	0			
7	Tâche 7			0								0	459		Non	Non	250	709	5	2	892,43	0	0	0	0	0	0	0			
8	Tâche 8	7		0								0	76		Non	Non	891	967	78	3	295,174	5000	4338,62	0	0	0	0	0			
9	Tâche 9			0								0	89		Non	Non	318	407	45	4	396,633	0	0	0	0	0	0	0			
10	Tâche 10			0								0	25		Non	Non	0	25	13	2	62,9084	0	0	0	0	0	0	0			
11	Tâche 11			0								0	46		Non	Non	1086	1132	2	7	322,621	0	0	0	0	0	0	0			
12	Tâche 12			0	3	5	8	4			2	0	78		Non	Non	661	739	6	3	238,111	0	0	0	0	0	0	0			
13	Tâche 13	9		0	10							0	13	1	Oui	Non	407	421	3	8	106,719	0	0	0	0	0	0	0			
14	Tâche 14			0								0	46		Non	Non	1112	1158	7	9	418,552	0	0	0	0	0	0	0			
15	Tâche 15	13		0	11	10	14					0	78		Non	Non	421	499	89	4	393,89	15000	13941,3	0	0	0	0	0			
16	Tâche 16	2	5	0								0	54	2	Non	Non	908	964	2	3	163,086	0	0	0	0	0	0	0			
17	Tâche 17	2	1	0								0	69	3	Non	Non	1033	1105	4	7	483,994	0	0	0	0	0	0	0			
18	Tâche 18	16		0								0	12	1	Non	Non	1069	1082	6	12	148,992	0	0	0	0	0	0	0			
19	Tâche 19	18	15	0	8	9						0	78		Non	Non	1167	1245	78	1	143,282	0	0	0	0	0	0	0			
20	Tâche 20			0								0	150		Non	Non	741	891	2	1	150,153	0	0	0	0	0	0	0			
21	Tâche 21	3	6	0	5	6	7	9	11		2	0	29	3	Oui	Non	934	966	3	3	89,412	0	0	0	0	0	0	0			
22	Tâche 22	3		0								0	69	1	Non	Non	391	461	5	8	553,895	0	0	0	0	0	0	0			
23	Tâche 23	22	21	0								0	31	3	Non	Non	991	1025	7	9	284,358	0	0	0	0	0	0	0			
24	Tâche 24	23		0	12	14						0	49	1	Non	Non	1028	1078	6	50	2446,19	0	0	0	0	0	0	0			
25	Tâche 25	24		0								0	53	4	Non	Non	1082	1139	45	7	407,849	0	0	0	0	0	0	0			
26	Tâche 26	25		0								0	100		Non	Non	1145	1245	25	9	914,558	0	0	0	0	0	0	0			
+	Fin			0								0	1300	0			1245	1245				15000	12496	0	0	0	0	0			

Fin de la dernière tâche : 1245 Coût : 24770 Gain : 30776

Revenu global à T0 : **6006**

Taux d'intérêt : 5,50%

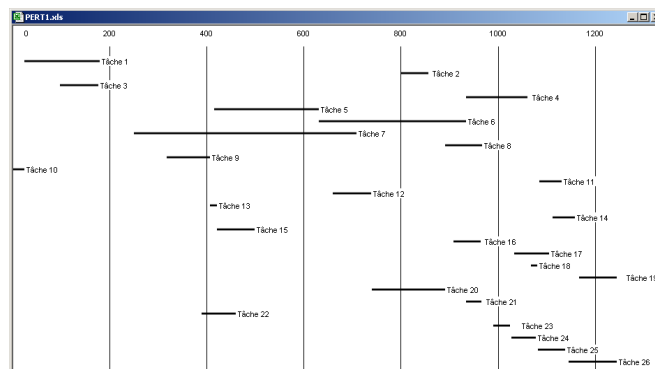


Figure 1. Outil d'ordonnancement

Outre la satisfaction des diverses 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 T0 par un taux d'intérêt. Aussi peut-on affecter à chaque tâche un coût initial (un échéancier de 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 être source de gain. La durée de traitement de l'exemple présenté est de l'ordre de 15 minutes avec un Pentium 4 (une durée d'environ 30 minutes est nécessaire pour traiter un exemple plus conséquent de 60 tâches dont 52 à optimiser).

A partir du diagramme « PERT » obtenu, l'outil permet d'évaluer l'impact d'une dérive calendaire ou d'un surcoût. La modification de la durée ou d'un coût relatif à une tâche se traduit alors par une modification du PERT et des coûts associés, avec apparition d'éventuelles contraintes de ressources ou de date au plus tard non satisfaites. Ainsi peut-on connaître l'impact d'un aléa sur la globalité du développement avant toute prise de décision et notamment juger de l'opportunité d'éventuelles actions de sécurisation. Il est également possible de régénérer le PERT en ligne, quand l'aléa survient, pour tenter de minimiser ses conséquences par un réajustement des tâches non encore réalisées. Une simulation du diagramme PERT, de type Monte-Carlo, peut enfin être réalisée pour obtenir des résultats prévisionnels, financiers ou calendaires, sous la forme de distributions statistiques. Les durées ou coûts de tâches élémentaires, sont alors caractérisés par des lois de probabilité (uniforme, triangulaire, normale, etc.).

ORDONNANCEMENT ROBUSTE

Outre la régénération ou la simulation d'un diagramme PERT soumis à aléa, un ordonnancement robuste peut résulter d'une optimisation réalisée à partir de résultats de simulation de type Monte-Carlo dans laquelle les risques identifiés au cours des analyses de

risques « projets », relatifs à des durées ou coûts de tâches élémentaires, sont caractérisés par des lois de probabilité. Différent de celui obtenu hors aléa et naturellement plus margé, l'ordonnancement devient ainsi robuste car il maximise, en moyenne, le critère choisi pour l'ensemble des cas aléatoires simulés. Mais la durée de traitement est alors beaucoup plus longue car elle est multipliée par le nombre de simulations nécessaires à l'évaluation de chacune des solutions.

C'est pourquoi une technique originale de couplage entre optimisation et simulation (Cabarbaye 2006) a été introduite pour diminuer la durée globale des traitements. Cette technique très efficace (division des temps de calcul par 30 environ sur différents cas tests) consiste à faire varier la précision de l'évaluation de chacune des solutions, en fonction des résultats (en moyenne et écart-type) d'une évaluation grossière menée préalablement. L'évaluation grossière résultera par exemple de 50 simulations et celle de l'évaluation fine de 50 à 2000 selon la qualité de la solution par rapport à celle de l'optimum courant.

A titre d'exemple, l'ordonnancement présenté précédemment a été modifié en remplaçant certains paramètres par des variables aléatoires centrées sur les anciennes valeurs de ces paramètres.

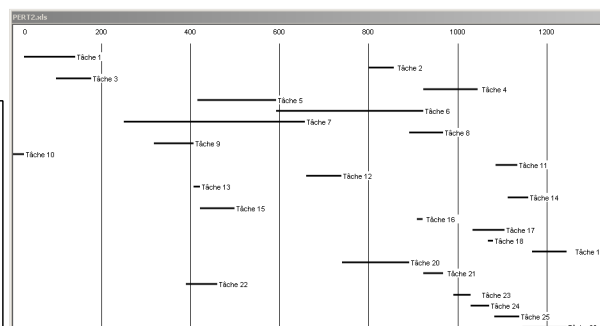
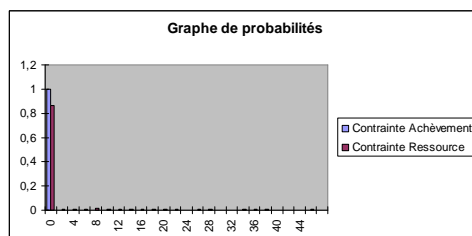
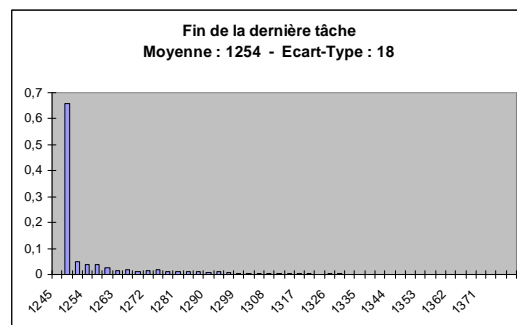
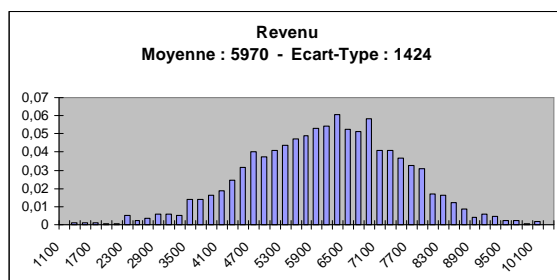


Figure 2. Réponse de l'ordonnancement déterministe

Durées :

Tâche 1 : Loi Normale ($m : 150, \sigma : 30$)
 Tâche 4 : Loi Normale ($m : 125, \sigma : 10$)
 Tâche 5 : Loi Normale ($m : 215, \sigma : 40$)
 Tâche 6 : Loi Triangulaire (valeur la plus probable : 302, min : 252, max : 352)

Tâche 7 : Loi Normale ($m : 459, \sigma : 50$)
 Tâche 10 : Loi uniforme (min : 10, max : 40)
 Tâche 11 : Loi Normale ($m : 46, \sigma : 5$)
 Tâche 16 : Loi Normale ($m : 54, \sigma : 15$)
 Tâche 18 : Loi uniforme (min : 2, max : 22)
 Tâche 21 : Loi Normale ($m : 38.4, \sigma : 8$)

Tâche 23 : Loi Normale ($m : 31, \sigma : 8$)
 Tâche 24 : Loi Normale ($m : 49, \sigma : 10$)

Coût début :

Tâche 15 : Loi Normale ($m : 89, \sigma : 15$)

Coût / durée :

Tâche 5 : Loi uniforme ($min : 20, max : 30$)

Tâche 18 : Loi Normale ($m : 12, \sigma : 3$)

La réponse à cet environnement aléatoire de l'ordonnancement obtenu à partir d'hypothèses déterministes est présentée en figure 2. Celle de l'ordonnancement généré par maximisation de l'espérance des revenus est présentée en

figure 3. L'optimisation a été menée à partir des résultats de 50 simulations pour les évaluations grossières et jusqu'à 2000 simulations pour les évaluations fines, selon la qualité des candidats. Chaque solution ayant fait l'objet de 74 simulations en moyenne (résultat fourni par l'outil), la durée globale du traitement (18 heures environ avec un Pentium 4) a donc été divisée par 27 par rapport à celle d'une optimisation menée uniformément à 2000 simulations.

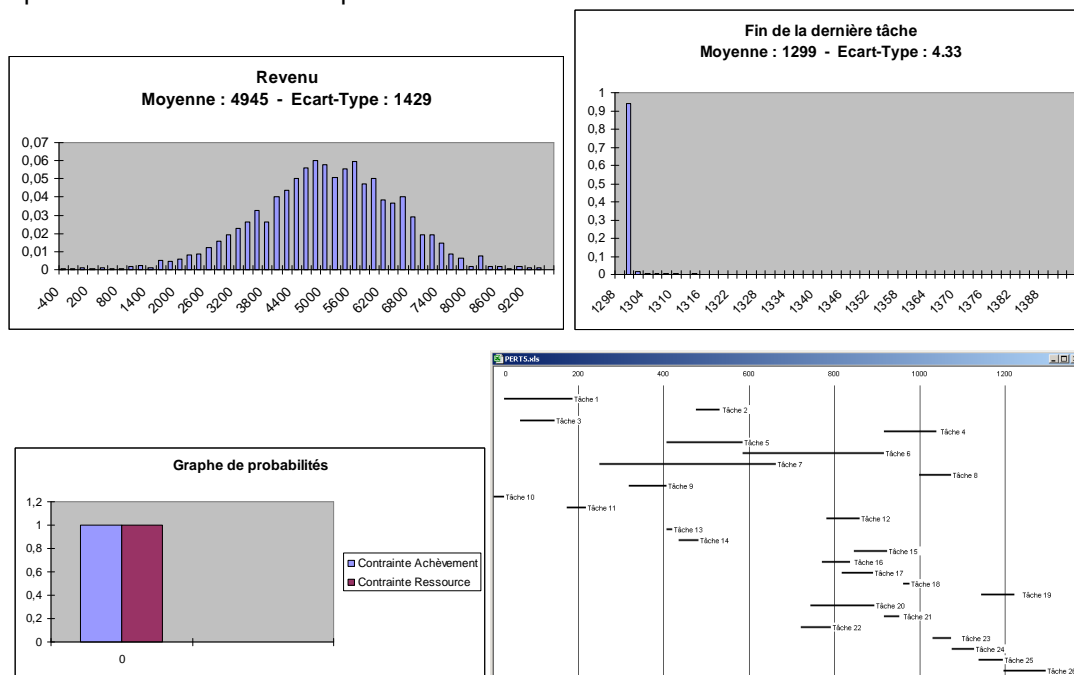


Figure 3. Réponse de l'ordonnancement robuste

Bien que dans cet exemple particulier, l'espérance de revenu de l'ordonnancement obtenu à partir d'hypothèses déterministes apparaisse supérieure à celle de l'ordonnancement généré directement dans l'environnement aléatoire, ce dernier se révèle plus robuste en termes de variance des dates de fin de dernière tâche, et surtout en termes de satisfaction des contraintes de ressources. En effet cette contrainte est toujours satisfaite par l'ordonnancement robuste alors qu'elle ne l'est pas dans environ 15 % des cas avec l'ordonnancement déterministe, comme le montre la distribution correspondante des valeurs de dépassement de cette contrainte.

DECISION DANS L'INCERTAIN

Cette problématique plus générale de la prise de décision dans l'incertain est encore en phase de formalisation et de maquettage. L'idée sous-jacente est de pouvoir attribuer à la réalisation de chacune des tâches, ou de

certaines d'entre elles, un poids par rapport à un objectif recherché (critère de décision). Ces tâches sont toujours soumises à des contraintes de précédence ou de ressources partagées et leur achèvement peut conditionner des événements aléatoires, dont l'occurrence est elle-même nécessaire au démarrage de nouvelles tâches. L'exemple relativement simple de la figure 4 illustre ce type de problématique. Celui-ci concerne une implantation d'usine pour lesquels deux sites peuvent être envisagés mais à des coûts très différents (coûts site 2 >> coûts site 1). La construction de l'usine pourra effectivement commencer dès la délivrance d'une autorisation administrative pour l'un des sites mais celle du site 1 présente un risque de ne jamais être délivrée (10 %). Sachant que l'usine ne sera source de revenu qu'à la condition de respecter une condition d'achèvement au plus tard (800 jours) et que tous les délais prévisionnels sont affectés de fortes incertitudes, à quel moment faut-il lancer l'étude préalable sur le site 2, en l'absence de

délivrance de permis de construire sur le site 1, pour maximiser une espérance de gain ?

Hypothèses de durée :

Etude site 1 : Loi Normale ($m : 50, \sigma : 20$)

Permis site 1 : Loi uniforme (min : 100, max :

300) avec 10% de risque de non délivrance (durée $\rightarrow \infty$)

Etude site 2 : Loi Normale ($m : 60, \sigma : 20$)

Permis site 2 : Loi uniforme (min : 50, max : 200)

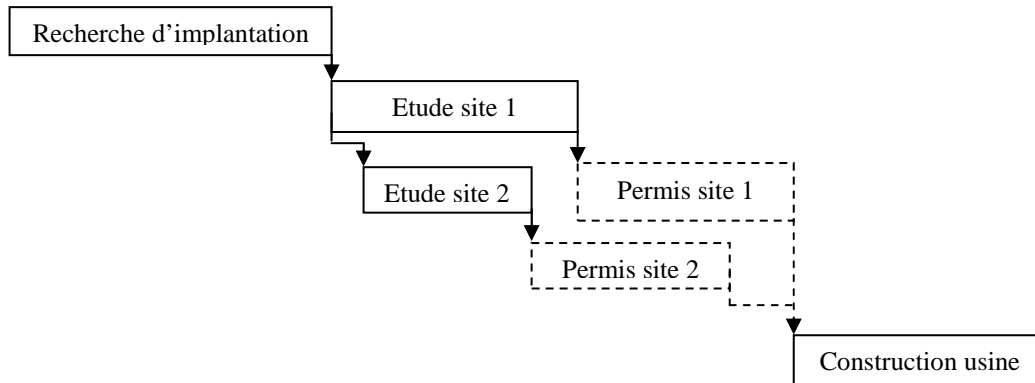


Figure 4. Exemple de prise de décision dans l'incertain

Ce type de problématique peut se formaliser, de manière similaire à celle d'un ordonnancement classique. Les événements aléatoires (délivrance des permis de construire) sont considérés comme des tâches à durée éventuellement infinie pour traiter l'absence d'occurrence (rejet du permis). Outre des conditions ordinaires de précédence (étude avant constitution du dossier de permis de construire), des conditions d'antériorité sont

définies au moyen d'opérateurs logiques (La condition Permis 1 OU Permis 2 autorise la construction d'usine).

Une optimisation couplée à une simulation de Monte-Carlo permet alors d'évaluer la date optimale de démarrage de l'étude préalable sur le site 2 en l'absence de délivrance de permis de construire sur le site 1 (date optimale correspondant à 248 jours après T_0 obtenue dans la table de la figure 5).

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)	Date(jr)	Date(jr)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)	(K Euro)		
1	Etude site 1			0				0	69,4	0	69,4		0	Non	Non	0	69	50	50	3502,75								0		
2	Permis site1	1		0				0	184	0	184		0	Oui	Non	69	253	20	3628,94									0		
3	Etude site 2			0				0	0,51	0	0,51		0	Non	Non	248	249	5000	100	4871,95								0		
4	Permis site2	3		0				0	146	0	146		0	Oui	Non	249	395	50	7240,75									0		
5	Construction usine	2	4	0				0	284	0	284		0	Oui	Non	253	538	500	56168,2	100000								92416,8		
+	Fin			0				0	800	0	800		0			692	692											0		
																	Fin de la dernière tâche :		692		Coût :		75413		Gain :		92417			

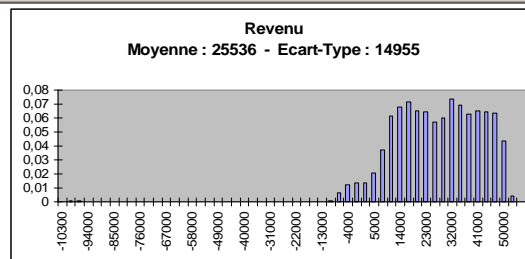


Figure 5. Formalisation et traitement

En outre, la durée de réalisation de certains événements pourrait être éventuellement

influencée (dépendances stochastiques) par la

réalisation de certaines tâches antérieures (étude d'impact...).

CONCLUSION

Bénéficiant d'une technique de couplage très performante entre optimisation et simulation de Monte-carlo, la méthode présentée permet de générer, en ligne ou hors ligne, des ordonnancements robustes aux aléas préalablement identifiés.

La problématique plus générale de la prise de décision dans l'incertain peut être traitée de la même manière, mais sa formalisation doit être approfondie et validée auprès d'utilisateurs potentiels avant d'aboutir au développement d'une fonctionnalité générique implémentée dans un outil.

REFERENCES

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

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

Cabarbaye A. (2003). Outil générique d'optimisation dans le domaine discret et/ou continu éventuellement stochastique - ROADEF'03 - Avignon

Cabarbaye A., Laulheret R. (2005). Ordonnancement robuste aux risques projets - QUALITA 2005 - Bordeaux

Cabarbaye A., Faure J., Laulheret R. (2006). Couplage entre optimisation et simulation stochastique - ROADEF'06 - Lille

Esswein C., Artigues C., Billaud J.-C. (2003). Maximiser la flexibilité sur une machine et dans un job shop : ordonnancements de groupes - ROADEF'03 - Avignon

Feoktistov V, Janaqi S. (2004) - Evolution différentielle - Une vue d'ensemble - MOSIM 04, NANTES

Goldberg D. E. (1994), Algorithmes Génétiques, Exploration optimisation et apprentissage automatique, Addison-Wesley

Lereno E., Morello B., Baptiste P. (2001), Système d'aide au paramétrage d'un logiciel l'ordonnancement, 3e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'01), Troyes

Pinedo M.L. (1995), Scheduling : theory, algorithms and systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey,

Renders J-M. (1995), Algorithmes génétiques et réseaux de neurone, Hermes

Vidal T., Bidot J., Beck J.-C., Laborie P. (2003). Gestion de projets sous incertitudes : un modèle de génération de plans flexibles en horizon glissant - ROADEF'03 - Avignon

BIOGRAPHIES

André CARBAYE

Expert Senior au Centre National d'études spatiales (CNES), André Cabarbaye est responsable de la Sûreté de Fonctionnement de différents systèmes satellitaires (Pléiades, Hélios..). Parallèlement à cette activité, il a créé la société CAB INNOVATION dans les domaines de la Simulation, Optimisation et Maîtrise des Risques, qui commercialise l'atelier de Sûreté de Fonctionnement SUPERCABPRO ainsi que le logiciel d'ordonnancement et de Maîtrise des Risques Projet CABPLAN. Il a assuré la Présidence de l'Institut de Sûreté de Fonctionnement (ISDF) Midi-Pyrénées de 1999 à 2002.

Julien Faure

Ingénieur au Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Julien Faure réalise des études de Sûreté De Fonctionnement sur différents projets de micro-satellites ainsi que pour des expériences destinées aux vols habités. Il a précédemment travaillé dans le milieu aéronautique sur les analyses de risque de plusieurs systèmes embarqués.

Roland Laulheret

Responsable du service Sûreté de Fonctionnement et Sécurité du Centre National d'Etudes Spatiales à Toulouse (CNES), Roland Laulheret a été en charge, à leur démarrage, de la SdF des filières mini et micro satellites.