



HAL
open science

PROPOSITION D'UN MODELE POUR L'ORDONNANCEMENT ET LA PLANIFICATION REACTIVE: APPLICATION A LA MAINTENANCE FERROVIAIRE

Yann Le Quéré

► **To cite this version:**

Yann Le Quéré. PROPOSITION D'UN MODELE POUR L'ORDONNANCEMENT ET LA PLANIFICATION REACTIVE: APPLICATION A LA MAINTENANCE FERROVIAIRE. Automatique / Robotique. UNIVERSITE DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT CAMBRESIS, 2004. Français. NNT: . tel-01456546

HAL Id: tel-01456546

<https://theses.hal.science/tel-01456546>

Submitted on 5 Feb 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UMR CNRS 8530
Numéro d'ordre :

THESE

présentée à
L'UNIVERSITE DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT CAMBRESIS

en vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR de l'Université de Valenciennes

Spécialité Automatique des Systèmes Industriels et Humains

par
yann LE QUERE

Titulaire d'un D.E.A "Automatique et productique" de l'université de Bordeaux I

**PROPOSITION D'UN MODELE POUR L'ORDONNANCEMENT ET LA
PLANIFICATION REACTIVE : APPLICATION A LA MAINTENANCE
FERROVIAIRE**

Soutenue le 8 septembre devant la commission d'examen composée de :

M. GOURGAND	Rapporteur	Pr. à l'université de Clermont-ferrand
B. GRABOT	Rapporteur	Pr. à l'ENI de Tarbes
M.-J. HUGUET	Examineur	M.d.C. à l'INSA de Toulouse
A. THOMAS	Examineur	M.d.C., HDR, à l'université d'Epinal
M. SEVAUX	Co-directeur	M.d.C., HDR, à l'université de Valenciennes
D. TRENTESAUX	Co-directeur	Pr. à l'université de Valenciennes
C. TAHON	Directeur de thèse	Pr. à l'université de Valenciennes
E. BLERVACQUE	Invité	Directeur adjoint de l'EIMM d'Hellemmes

Remerciements

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une thèse CIFRE (Contrat Industriel de Formation par la Recherche). Le contrat a été passé entre trois partenaires : l'Etablissement Industriel de Maintenance du Matériel (EIMM) d'Hellemmes, le Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines (LAMIH) de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis (UVHC) et le doctorant. Ce contrat, d'une durée de trois ans, a été mis en place par Monsieur Gilles MARTIN directeur de l'EIMM d'Hellemmes et le Professeur Christian TAHON directeur de l'équipe Système de Production du LAMIH. C'est donc vers eux que vont mes premiers remerciements.

Je souhaite également remercier tous ceux qui ont aidé par leur encadrement et leur conseil à la réalisation de ce travail. Du côté du laboratoire, Messieurs Marc Sevaux et Damien Trentesaux, du côté de la SNCF, Messieurs Airy Magnien et Eric Blervacque, dont l'expérience a été fort gratifiante.

Je tiens à adresser ma chaleureuse reconnaissance auprès de l'ensemble de mes collègues du laboratoire, Frédéric Tomala, Dante Gingali, Salah Bousbia et tous les autres mais la liste ne saurait être exhaustive, pour la bonne humeur qu'ils m'ont donné, ainsi que mes collègues de la SNCF, Catherine Trevet, Pascal Fournier, Christophe Saily, Michel Parent et André Fontaine pour son assistance quotidienne.

Il convient également de souligner l'affection donnée par mes proches, c'est à dire en premier lieu ma famille qui m'aura soutenue pendant toute la durée de ces travaux de recherche. En second lieu, je tiens à remercier mes amis de Marcoussis avec lesquels les rares moments de détente m'ont permis de recharger mon énergie.

Enfin, je souhaite exprimer mes salutations à l'ensemble de mes camarades du rugby de l'ESML et du LUC pour m'avoir épargné lors des rencontres et pour leur franche camaraderie.

Table des matières

Chapitre I	Contexte industriel et problématique	4
I.1	L'EIMM : contexte et problématique industrielle	4
I.2	Modèle systémique de l'EIMM	8
I.2.1	Les concepts de l'analyse systémique	8
I.2.2	Le système d'information	11
I.2.3	Le système opérant	14
I.2.4	Le système de décision	18
I.3	Problématique du pilotage d'un système de production	25
I.3.1	Activité du système de pilotage	26
I.3.2	Structure du système de pilotage	28
I.3.3	Evolution du système de pilotage	29
I.4	Conclusion	31
Chapitre II	Les systèmes de pilotage de production	34
II.1	Structure du système de pilotage	34
II.1.1	Vue ontologique	34
II.1.2	Vue fonctionnelle	37
II.1.3	Vue génétique	41
II.2	Modèles des activités de pilotage	42
II.2.1	Vue ontologique	43
II.2.2	Vue fonctionnelle	44
II.2.3	Vue génétique	46
II.3	Spécifications pour la modélisation des systèmes de pilotage	47
II.3.1	Vue ontologique	48
II.3.2	Vue fonctionnelle	48
II.3.3	Vue génétique	48
II.4	Conclusion du chapitre	49
Chapitre III	Proposition d'un modèle de pilotage pour l'ordonnancement et la planification réactive	52
III.1	Modèle de la structure de pilotage	52
III.1.1	Le réseau de pilotage	53
III.1.2	Temps de réaction de la structure de pilotage	58
III.2	Modèle des fonctions de pilotage	59
III.2.1	Propagation de contraintes	59
III.2.2	Borne inférieure d'un problème d'ordonnancement	64
III.2.3	Planification	65
III.3	Réactivité du système de pilotage	67
III.3.1	Définition de la réactivité	67
III.3.2	Réactivité du système de pilotage	68
III.4	Conclusion du chapitre	70

<i>C</i>	<i>Chapitre IV Mise en œuvre</i>	73
IV.1	Instanciation du modèle du système de pilotage	74
IV.1.1	Paramétrage de la structure du réseau	75
IV.1.2	Paramétrage du réseau	76
IV.1.3	La fonction Propage	80
IV.2	Implémentation des algorithmes de planification et d'ordonnancement	84
IV.2.1	Planification	84
IV.2.2	Ordonnancement	86
IV.3	Maquette informatique	87
IV.3.1	Liaison entre les applications	87
IV.3.2	Algorithme général pour l'analyse de la réactivité	87
IV.4	Conclusion du chapitre	88
<i>Chapitre V</i>	<i>Application</i>	90
V.1	Présentation du modèle	90
V.1.1	Structure de décision étudiée	90
V.1.2	Instances du modèle	92
V.2	Protocole expérimental	94
V.2.1	Date de détection et durée de l'aléa	94
V.2.2	Affectation des tâches	95
V.2.3	Disponibilité des informations	98
V.3	Résultats et commentaires	98
V.3.1	Temps de réaction et durée des aléas	98
V.3.2	Affectation des tâches	102
V.3.3	Disponibilité des informations	104
V.4	Conclusion du chapitre	105

Table des figures

Chapitre I

Figure I-1 Fréquence et consistance des phases de maintenance d'une rame PSE	4
Figure I-2 Exemple de gamme opératoire simplifiée	5
Figure I-3 Organigramme de l'EIMM d'Hellemmes	6
Figure I-4 Organigramme détaillé de l'EIMM d'Hellemmes	7
Figure I-5 Environnement du système étudié	9
Figure I-6 Décomposition d'un système de production	11
Figure I-7 Temps de transmission de l'information	12
Figure I-8 Un ordonnancement avec des marges libres	17
Figure I-9 Le processus décisionnel selon Simon	18
Figure I-10 Un exemple de modèle d'un problème d'ordonnancement	19
Figure I-11 Les boucles de réaction à l'EIMM d'Hellemmes	22
Figure I-12 Les propriétés de flexibilité selon GOTH A	24
Figure I-13 Modèle d'un système de pilotage	28

Chapitre II

Figure II-1 Le modèle conceptuel GRAI pour un centre de décision	36
Figure II-2 La boucle de pilotage du modèle PCS	38
Figure II-3 Un module de pilotage d'après Huguet	39
Figure II-4 Fonctions de décision pour un centre	40
Figure II-5 Modèle générique d'un centre de décision	41
Figure II-6 Un exemple de processus selon [TREN 01]	41

Chapitre III

Figure III-1 Modèle local de pilotage	54
Figure III-2 Coordination entre deux centres de décision	56
Figure III-3 Arbitrage de décision par un centre de décision CD_n	58
Figure III-4 Précédence interdite-Précédence obligatoire.	61
Figure III-5 Tâche i non première.	62
Figure III-6 Tâche I non insérable dans un ensemble S .	63
Figure III-7 Exemple d'ordonnancement réactif	69

Chapitre IV

Figure IV-1 Schéma de la structure de décision de l'exemple illustratif	73
Figure IV-2 Graphe $G(V,P,D)$ associé à l'exemple d'implémentation	74
Figure IV-3 Ordonnements initiaux pour les ressources 1 et 2	74
Figure IV-4 Modèle de pilotage de deux centres de décision	79
Figure IV-5 Les deux alternatives de la propagation de contraintes	83
Figure IV-6 Ré-ordonnement du scénario 2	83
Figure IV-7 Schéma de l'algorithme pour l'analyse de la réactivité	87

Chapitre V

Figure V-1 Structure du système de décision étudié	91
Figure V-2 Graphe du problème d'ordonnement pour une remorque	93

<i>Figure V-3 Schéma de la structure du système de pilotage par produit</i>	96
<i>Figure V-4 Comparaison des ré-ordonnancements en fonction de la durée des aléas</i>	99
<i>Figure V-5 Comparaison des réactivités en fonction de la durée des aléas</i>	100
<i>Figure V-6 Comparaison des réactivités en fonction des temps de réaction</i>	101
<i>Figure V-7 Comparaison des réactivités selon une affectation par produit</i>	102
<i>Figure V-8 Comparaison des réactivités selon une affectation par métier</i>	103
<i>Figure V-9 Comparaison des réactivités sans informations</i>	104

Table des tableaux

<i>Tableau I-1 Recensement des aléas à l'EIMM d'Hellemmes</i>	17
<i>Tableau II-1 Synthèse des apports de la communauté scientifique</i>	47
<i>Tableau V-1 Récapitulatif des temps de réaction en heures</i>	93
<i>Tableau V-2 Affectation des tâches aux ressources</i>	94
<i>Tableau V-3 Affectation des tâches aux ressources par produit</i>	97
<i>Tableau V-4 Affectation des tâches aux ressources par métier</i>	97

Table des Algorithmes

<i>Algorithme III-1 Algorithme de planification</i>	66
<i>Algorithme IV-1 La fonction Propage</i>	81

Introduction

Dans un contexte concurrentiel fort, les entreprises cherchent en permanence à améliorer leur compétitivité. Celle-ci repose autant sur la qualité des produits ou des services que sur les coûts et les délais de leur prestation. Ces dernières décennies, ce contexte a poussé les entreprises à se focaliser sur les activités pour lesquelles leurs performances étaient les meilleures et à sous-traiter les activités pour lesquelles leurs performances étaient moins bonnes. Ce phénomène a largement contribué à l'apparition de réseaux d'entreprises concernées par la fabrication d'un même produit. Dans les années 80, la distribution des activités au sein d'un réseau de production et une concurrence très forte ont amené les entreprises à s'organiser autour du concept de système de production distribué. Dans un tel système, chaque sous-système possède une autonomie de décision ajustable par échange d'informations avec les autres sous systèmes.

Par ailleurs, la variabilité des marchés a conduit les entreprises vers plus de diversité. Cette diversité se manifeste par la personnalisation de produit standardisé. Ainsi, la gamme de produits offerts est grande et le nombre de métiers nécessaires à leur fabrication reste faible. Mais la demande reste variable en terme de quantité. Cette variabilité quantitative des marchés se répercute directement au niveau des charges de l'entreprise. En outre, les entreprises sont liées en amont à leurs fournisseurs confrontés aux mêmes problèmes. Le besoin de s'adapter à ces conditions changeantes est crucial et l'aptitude d'une entreprise à s'adapter rapidement et en cohérence à ces changements, c'est-à-dire sa réactivité, est également un facteur de compétitivité.

D'une manière analogue aux réseaux d'entreprise, le phénomène de distribution des activités au sein d'une entreprise s'est progressivement développé, plus particulièrement dans les cas où les produits fabriqués nécessitent un grand nombre d'opérations. Grâce aux technologies de l'information, les organisations strictement hiérarchiques ont été délaissées au profit d'organisations jugées plus souples où les décisions sont distribuées entre plusieurs entités de production autonomes. Cette nouvelle décomposition a permis à la fois de simplifier la gestion de nombreuses informations et de traiter ces informations avec beaucoup plus de précision (les approches MRP dont le défaut était de sous contraindre les problèmes, c'est-à-dire de donner des objectifs basés sur des calculs de capacité des ressources mensuelles, ont été remplacées par des approches itératives, mêlant planification et ordonnancement, plus proches des capacités quotidiennes de production). Actuellement, le choix de telles structures de décision repose bien souvent sur des constatations pragmatiques sans nécessairement s'appuyer sur une démonstration de l'efficacité réelle d'une structure par rapport à une autre pour une problématique et un environnement de production particuliers.

Depuis une vingtaine d'années, le monde de la recherche s'intéresse au concept de système de production distribué et aux problématiques sous-jacentes. Le champ d'exploration de ces problématiques est très large. Il englobe notamment la conception, la modélisation, la simulation et l'aide à la décision que ce soit pour les systèmes de décision, d'information ou les systèmes opérant. Les travaux réalisés ont abouti à des typologies des systèmes de production. En revanche la simulation du comportement des sous-systèmes en interaction et l'analyse reposant sur des mesures objectives des performances de la structure de décision n'ont été jusqu'à présent que très peu étudiées. L'objet de ce mémoire est donc de proposer une méthode visant à déterminer l'impact d'une structure de décision sur la réactivité de l'entreprise par rapport à une problématique de production. Cette méthode est mise en œuvre avec un outil s'appuyant sur la simulation du processus de ré-ordonnancement. Cet outil, utilisé dans le contexte industriel de l'Etablissement Industriel de Maintenance du Matériel

(EIMM) d'Hellemmes, permet l'analyse du système de décision et du système d'information dans un contexte de pilotage des activités de maintenance du matériel roulant de la SNCF.

Ce mémoire comporte cinq chapitres dont l'organisation est la suivante :

Le contexte du projet, sur lequel L'EIMM et le LAMIH-SP ont collaboré, est présenté dans le premier chapitre. Nous décrivons tout d'abord les objectifs industriels de l'EIMM puis l'analyse systémique nous permet d'établir un diagnostic des problèmes auxquels l'EIMM d'Hellemmes est confrontée. Ils résultent en particulier d'une double nécessité : prévoir la nature et le volume de la production à réaliser et réagir aux aléas en cohérence avec la prévision initiale et l'avancement des travaux.

Dans le second chapitre, nous exposons les travaux scientifiques menés sur les problématiques des systèmes de pilotage. Leur analyse nous conduit à élaborer des spécifications pour la modélisation des systèmes de pilotage et les méthodes d'ordonnancement. Ces spécifications mettent en avant d'une part, la nécessité de prendre en compte certains aspects de l'activité de décision au niveau de la structure du système de pilotage. D'autre part, elles montrent le besoin de prendre en compte les caractéristiques du système de pilotage au niveau des activités de décision.

Le troisième chapitre présente en premier lieu le modèle de la structure de décision puis un modèle pour les activités de décision. Le principe de l'intégration des caractéristiques de la structure du système de décision dans les activités de décision est ensuite énoncé. Cette intégration permet de mesurer la réactivité du système de pilotage fondée sur l'intégration des temps de réaction induits par les acteurs du processus de décision.

La mise en œuvre de la méthode proposée est explicitée dans le chapitre quatre. Nous illustrons, à partir d'un exemple, la modélisation et le paramétrage du système de pilotage en fonction des caractéristiques de la structure de décision et de la problématique de production de l'exemple illustratif. L'implémentation des algorithmes de planification et d'ordonnancement est ensuite présentée. L'utilisation du modèle est ensuite illustrée à travers des scénarii types.

Dans le chapitre cinq, nous présentons l'utilisation de la méthode sur un problème issu d'un cas concret rencontré à l'EIMM d'Hellemmes. L'utilisation de l'outil de simulation dans ce contexte permet de mesurer la performance du système de décision en terme de réactivité.

Chapitre I

Contexte industriel et problématique

I.1	L'EIMM : contexte et problématique industrielle	4
I.2	Modèle systémique de l'EIMM	8
I.2.1	Les concepts de l'analyse systémique	8
I.2.1.1	Notion de système	8
I.2.1.2	Les processus	9
I.2.1.3	Les systèmes complexes	10
I.2.2	Le système d'information	11
I.2.3	Le système opérant	14
I.2.4	Le système de décision	18
I.3	Problématique du pilotage d'un système de production	25
I.3.1	Activité du système de pilotage	26
I.3.2	Structure du système de pilotage	28
I.3.3	Evolution du système de pilotage	29
I.4	Conclusion	31

Chapitre I

Contexte industriel et problématique

Dans la première partie de ce chapitre, nous rappelons tout d'abord le contexte des travaux menés en collaboration entre l'EIMM d'Hellemmes et le LAMIH-SP. L'entreprise et ses activités sont présentées dans l'optique d'exposer les problèmes scientifiques qu'elles posent.

Dans la deuxième partie, après avoir rappelé les éléments fondamentaux de l'analyse systémique, nous présentons, à partir des observations réalisées sur le site, le modèle systémique de l'EIMM que nous avons élaboré afin de mettre en évidence les différents problèmes existant au sein de l'EIMM.

L'analyse précédente montre l'importance des problèmes relatifs au système de décision, et en particulier le pilotage des activités de l'EIMM. La troisième partie de ce chapitre expose le problème générique du pilotage, qui constitue la thématique essentielle de notre travail.

II.1 L'EIMM : contexte et problématique industrielle

L'étude menée par l'EIMM d'Hellemmes et le LAMIH-SP concerne la planification et la réactivité des activités de maintenance des matériels ferroviaires (Rame TGV, voitures Corail) dont l'EIMM assure la maintenance et la reconfiguration. Le matériel ferroviaire (appelé engin dans la suite de ce mémoire) doit être maintenu selon une fréquence et une consistance bien déterminées par les réglementations nationales et internationales et par le retour d'expérience de la SNCF. La maintenance des engins peut concerner le démontage de quelques éléments de l'engin ou son démantèlement complet pour la cas des opérations de maintenance mi-vie. Par exemple le cycle de maintenance d'une rame TGV Paris Sud Est peut être décrit à l'aide de la figure I-1.

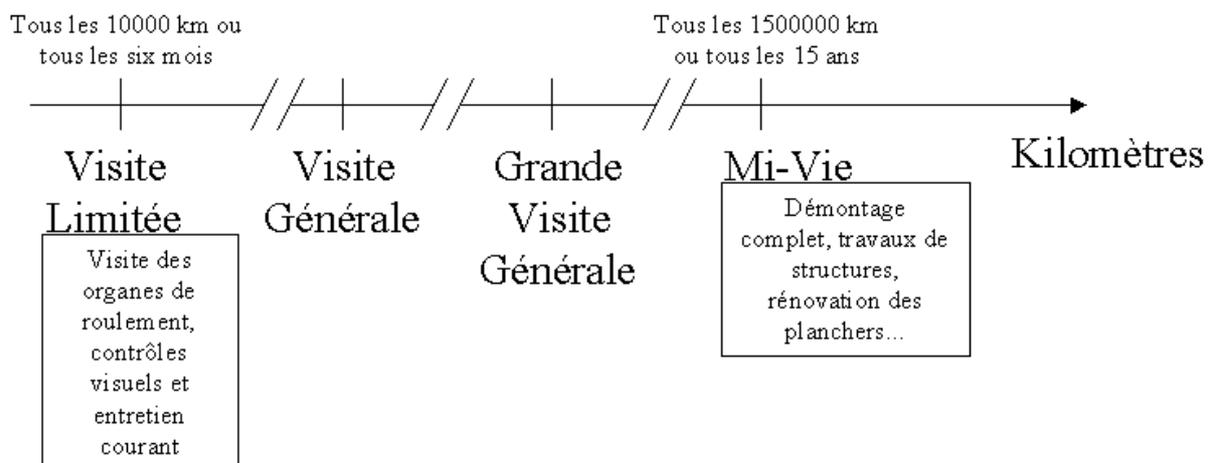


Figure II-1 Fréquence et consistance des phases de maintenance d'une rame PSE

Les opérations de maintenance concernant un même type d'engin sont regroupées en projet. On associe à un projet un type d'engin, par exemple les rames TGV Paris Sud Est et un

niveau de maintenance, la maintenance mi-vie. Un projet peut regrouper entre une dizaine et une centaine d'engins du même type. En moyenne, le nombre de projets différents lors d'une année est de l'ordre de 4 à 5. Les projets les plus complexes comportent un millier de tâches élémentaires à réaliser pour chaque engin. De manière très générale, les tâches appartiennent à des phases particulières des activités de maintenance que l'on peut schématiser par la figure I-2. De plus, il existe certaines spécificités pour chaque projet telles que le nombre d'engins du même type simultanément immobilisés, la durée totale du projet, le budget qui lui est alloué ou les prévisions de circulation des engins maintenus. Ces spécificités entraînent des notions de priorité entre les différents projets.

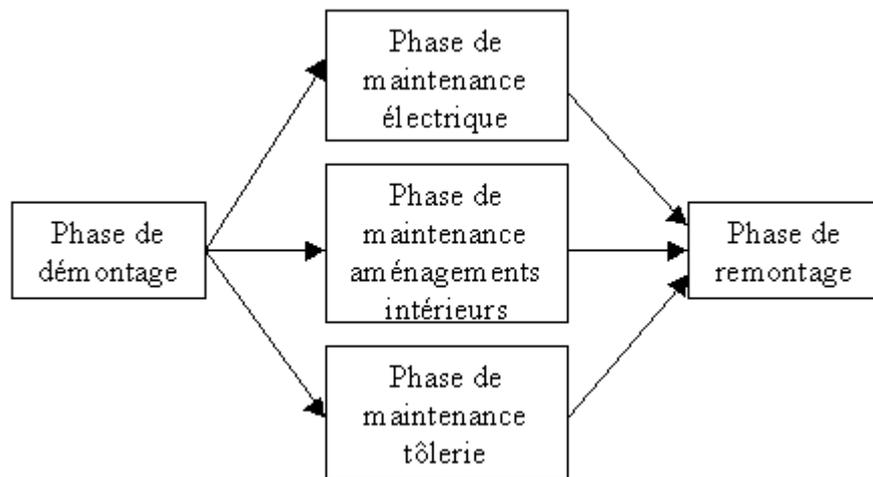


Figure II-2 Exemple de gamme opératoire simplifiée

Pour réaliser ces opérations de maintenance, l'établissement d'Hellemmes dispose de ressources humaines et matérielles. Il y a environ 400 personnes qui travaillent directement pour les opérations de maintenance sur engin. Les ressources humaines sont regroupées au sein d'unités de travail par métier ou par produit. Les unités regroupées par métier ne comportent que des agents d'un même corps de métier (par exemple uniquement des électriciens, ou uniquement des tôliers). Les unités regroupées par produit comprennent des agents aux corps de métier complémentaires pour la réalisation des tâches d'un produit spécifique (exemple: la voiture bar d'un TGV nécessite des aménagements intérieurs, des électriciens et des climaticiens).

Par ailleurs, la réalisation de certaines opérations de maintenance nécessite des ressources spécifiques disponibles en quantité limitée (par exemple les opérations de peinture dans un bâtiment équipé de ventilation aux normes, de passerelles d'accès à la toiture...). Certaines opérations nécessitent donc un bâtiment, une voie ou un outillage spécifique dont on utilise une certaine proportion (par exemple, il y a 4 voies de peinture dans le bâtiment prévu à cet effet, chaque engin utilisera donc un quart du bâtiment peinture). Ces ressources sont variées. Elles peuvent être des bâtiments, des voies dédiées, des vérins hydrauliques pour l'élévation des engins ou simplement un engin. En effet, un engin peut être considéré comme une ressource pour laquelle il est nécessaire de gérer la disponibilité puisqu'on ne peut pas demander à des personnes de travailler simultanément au même endroit. Précisément, les emplacements à l'intérieur, sous ou autour de l'engin à maintenir ne peuvent contenir simultanément qu'un nombre limité de personnes qu'il faut gérer. Pour des compléments d'informations, le plan du site en annexe 1 comporte l'emplacement des unités de travail et les bâtiments qu'elles occupent.

Pour résoudre la complexité inhérente au nombre de ressources à gérer, l'entreprise s'est organisée en unité de production (UP) regroupant plusieurs unités de travail (UT). D'autre part, les services traditionnels d'une entreprise comme les ressources humaines, les approvisionnements, les méthodes, la qualité, l'entretien et la maintenance des ressources sont organisés en pôles d'appui selon l'organigramme simplifié représenté par la Figure I-3. Cet organigramme contient les acronymes (en gras) utilisés dans la suite du mémoire.

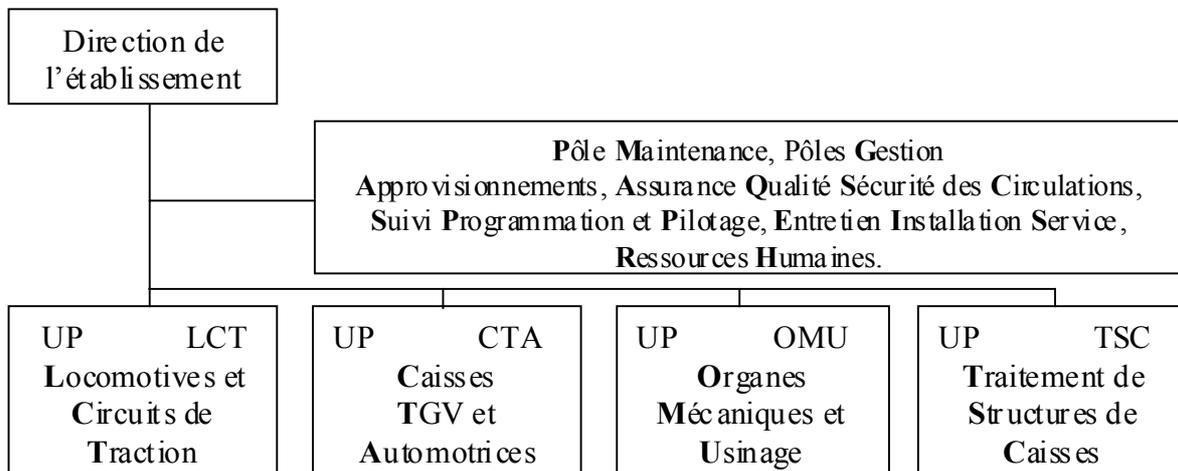


Figure II-3 Organigramme de l'EIMM d'Hellemmes

Sur l'organigramme détaillé (figure I-4), on observe plusieurs niveaux de coordination. Au niveau des chefs d'unité de production (CUP), les objectifs concernent la performance globale de l'établissement définie dans le paragraphe suivant. Les chefs d'unité de production se coordonnent pour affecter les charges des projets aux unités de production. Au niveau de leur adjoint (ACUP), les objectifs sur lesquels la performance est mesurée sont liés aux projets. La coordination à ce niveau correspond à l'affectation des engins aux unités de travail. A ce niveau, la liaison entre les pôles d'appui et les unités de production est assurée par des coordinateurs d'activités au sein des pôles concernés par la production. Enfin au niveau des unités de travail, les dirigeants d'unité de travail (DUT) ont pour objectif la réalisation des tâches sur les engins.

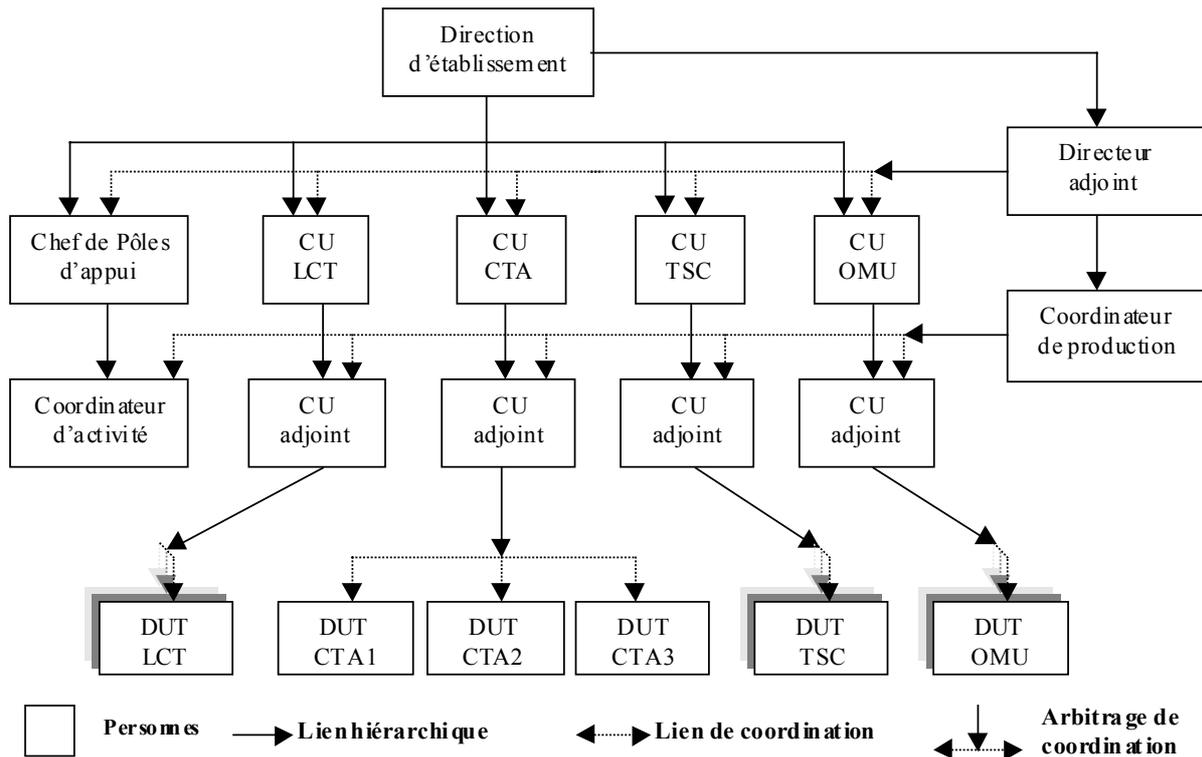


Figure II-4 Organigramme détaillé de l'EIMM d'Hellemmes

Chaque projet étant par nature spécifique, la performance globale de l'établissement est mesurée par le nombre d'heures de travail réalisées chaque année. En effet, pour mesurer l'évolution de la performance de l'établissement d'une année sur l'autre, il convient d'avoir une mesure indépendante de la nature et des spécificités de chaque projet. C'est pourquoi, la direction du matériel de la SNCF utilise ce critère de performance afin de caractériser la productivité des établissements du matériel de la SNCF. Cet objectif est soumis à une augmentation de 5% de la productivité ainsi calculée chaque année. Cependant, l'établissement s'intéresse également à sa performance sur chacun des projets qu'elle doit réaliser. Le critère relatif aux projets est la durée d'immobilisation de chaque engin.

D'après les constats réalisés dans [LEQ 01] sur l'année 2000, l'ensemble des engins traités en opération mi-vie a accusé un retard compris entre 1 et 20 jours pour un cycle de maintenance mi-vie de 50 jours pour chaque engin. L'écart entre les objectifs et les performances réelles sur ce projet mi-vie de l'année 2000 est de l'ordre de 12 %. Plus précisément, sur les 350 jours du projet initial, 45 jours supplémentaires ont été nécessaires pour réaliser les opérations mi-vie.

Dans les sections suivantes, nous présentons un diagnostic puis une synthèse des problèmes rencontrés à l'EIMM d'Hellemmes [LEQ 02a]. Après avoir précisé les définitions des notions de système, de processus et de système complexe qui nous serviront tout au long de ce mémoire, nous livrons une analyse des systèmes de production. Cette analyse fait ressortir les problèmes de chacun des sous systèmes composant le système de production de l'EIMM d'Hellemmes.

II.2 Modèle systémique de l'EIMM

En première approche, l'analyse systémique est pertinente pour l'analyse de systèmes complexes tels que l'EIMM. Après un rappel des concepts fondamentaux de l'approche systémique, nous présentons l'analyse systémique de l'EIMM que nous avons menée et le modèle que nous avons élaboré.

II.2.1 Les concepts de l'analyse systémique

II.2.1.1 Notion de système

Un système traduit la représentation d'un objet qu'un observateur a formalisé. Lemoigne dans [LEM 94] définit un système par « un objet qui dans un environnement [...] fait une activité par sa structure qui se transforme dans le temps ». L'objet système est donc caractérisé par :

- son activité,
- sa structure interne,
- son évolution.

L'activité du système met en oeuvre sa finalité, par exemple la réalisation de produits pour un système de production. La structure interne du système décrit comment les différents organes et individus du système sont agencés et mis en relation [CAM 00]. L'évolution en systémique est une notion qui comprend l'évolution des activités et de la structure du système induite par la modification de l'environnement extérieur afin d'atteindre ses objectifs. L'enchaînement répétitif des activités dans le temps forme une chaîne d'activités que l'on appelle processus. La définition de la notion de processus est donné dans la section suivante.

L'EIMM est un système dont la finalité est la maintenance de matériel ferroviaire. Le matériel à maintenir est soit des éléments constitutifs d'un engin dont le démontage a été réalisé par un autre établissement de la SNCF soit le matériel roulant directement concerné par une phase de maintenance. Nous nous intéressons plus précisément à la réparation ou à la modification de rames TGV ou de voitures Corail. Celles ci sont assujetties à des contraintes particulières que nous présentons par la suite (cf. Chapitre I.2.3).

L'environnement du système (figure I-5) que l'on étudie concerne les acteurs en relation directe avec l'établissement : les fournisseurs ou les sous traitants (entrée du système) qui produisent les différentes pièces à remonter, les clients (entrée et sortie du système) qui fournissent les engins à maintenir et les donneurs d'ordres que représentent la direction régionale et la Direction du Matériel. La direction régionale fixe les objectifs en terme de budget pour l'établissement et la Direction du Matériel donne les objectifs en terme de charge de travail confiées à l'établissement.

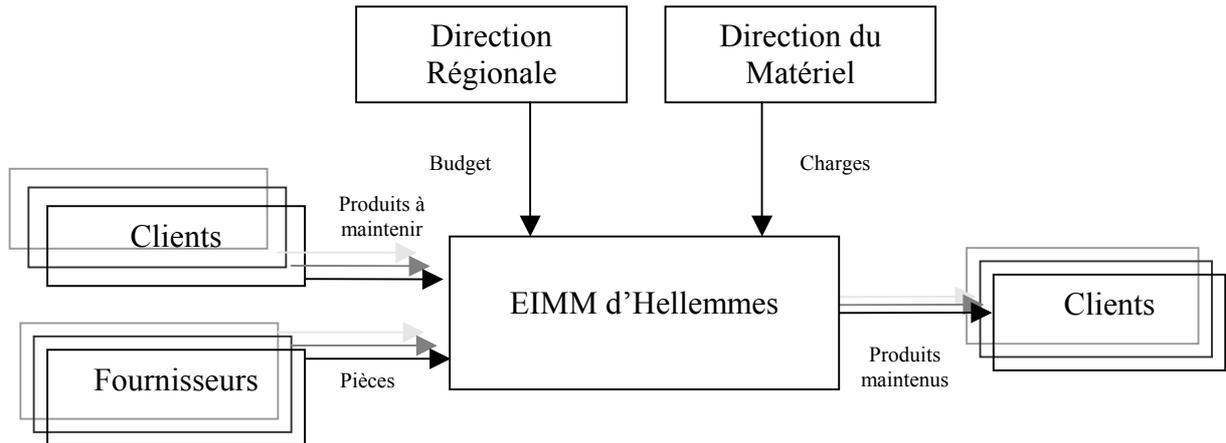


Figure II-5 Environnement du système étudié

La structure de L'EIMM caractérise la manière dont on répartit l'ensemble des ressources nécessaires à la réalisation des activités de maintenance et les centres de décision responsables de ces ressources. D'une manière générale, l'organigramme de l'établissement (figure I-4) fournit une vision agrégée de la structure de l'établissement. Le schéma de l'annexe 2 représente les parties de la structure de l'EIMM qui sont directement concernées par la réalisation des tâches de maintenance des engins.

L'évolution du système de production repose essentiellement sur les modifications de la structure du système de production en fonction des activités de maintenance prévues dans les années à venir. Ces modifications concernent le nombre de ressources dans chaque unité de production et leur regroupement au sein d'unité de travail et de production en fonction des corps de métier.

II.2.1.2 Les processus

Du point de vue de Lemoigne, "un processus inclut l'activité du système et son évolution". Le positionnement de l'activité dans le temps, seule ou en relation avec d'autres activités, forme un processus dans la mesure où le système répète cette activité tant qu'elle répond à la finalité du système. En effet selon [BRA 95], un processus est une suite organisée et ordonnée de faits ou d'opérations présentant une certaine unité ou se reproduisant avec une certaine régularité pour atteindre un but. On comprend alors qu'un processus peut être formé de plusieurs sous processus. Par exemple, un processus de pilotage est formé par la composition des activités de décision et d'information ou plus généralement par la composition des processus de décision et d'information du système. La composition de nombreuses entités de nature différentes, fortement dépendantes les unes des autres, s'apparente à la notion de système complexe que nous définissons dans la section suivante.

Les processus mis en place à l'EIMM sont représentés par des procédures et des consignes régissant les activités de gestion du personnel, par la définition des profils de postes concernant les activités de chaque centre de décision. Les réunions de coordination entre les dirigeants d'unité, entre les chefs d'unités de production ou entre leur adjoint et le coordinateur de production forment également des processus d'information et de décision.

II.2.1.3 Les systèmes complexes

Un système complexe est un système que l'on tient pour irréductible à un modèle fini [MES 80]. La complexité de tels systèmes repose donc sur le nombre de sous systèmes le composant, la diversité et le nombre des interactions qu'ils ont entre eux. Selon [MAS 99], si l'on s'intéresse au comportement des systèmes, un système complexe est un système formé de nombreux éléments sujets à des interactions non linéaires. Cette vision comportementaliste de la complexité est réductrice car certains sous systèmes linéaires dotés de boucles de rétroaction rend le comportement du système global fortement sensible aux conditions initiales, par exemple les couples ago-antagonistes dans [BRA 95]. La non linéarité des connexions dans un système n'est donc pas la seule cause à la complexité. En effet, de nombreux sous systèmes au comportement linéaire liés par de multiples connexions à un grand nombre de sous systèmes également linéaires confère une sensibilité aux conditions initiales tout aussi importante que celle d'un système non linéaire. Dès lors, il n'est plus possible d'anticiper ce qui va se passer lorsqu'au sein d'un système plusieurs variables interconnectées jouent à la fois le rôle de cause et d'effet. L'approche donnée par Pesin dans [PES 01] confirme notre point de vue de la complexité. Celle-ci se définit par :

- un grand nombre d'entités,
- liées par de nombreuses interactions,
- dont la nature est variée,
- dans un environnement dynamique.

La complexité des systèmes à maintenir est une des causes de la complexité de l'organisation à l'EIMM d'Hellemmes. Les engins accueillis dans l'établissement d'Hellemmes sont composées de nombreux éléments en interaction dont la maintenance nécessite des compétences diverses. Bien que réparties entre plusieurs entités opérantes distinctes, les tâches de maintenance sur ces sous systèmes ne sont pas indépendantes. Les liens d'informations et de décisions sont alors nombreux du fait de ces interactions.

Pour réaliser l'analyse du système de production, nous considérons classiquement trois sous systèmes distincts selon la décomposition des systèmes auto-régulés proposée par Lemoigne. La régulation de la production dans les systèmes de production implique l'existence d'un système opérant, d'un système de décision et d'un système d'information. Ces sous systèmes sont en étroite relation pour réaliser la finalité du système de production. L'activité, la structure et l'évolution de chacun des ces sous systèmes constituent par leurs interactions le système de production. La définition et l'organisation des relations entre le système de décision et le système opérant, conduisant à la mise en œuvre d'une boucle de rétroaction (figure I-6) définit, selon Lemoigne, le concept de pilotage d'un système de production.

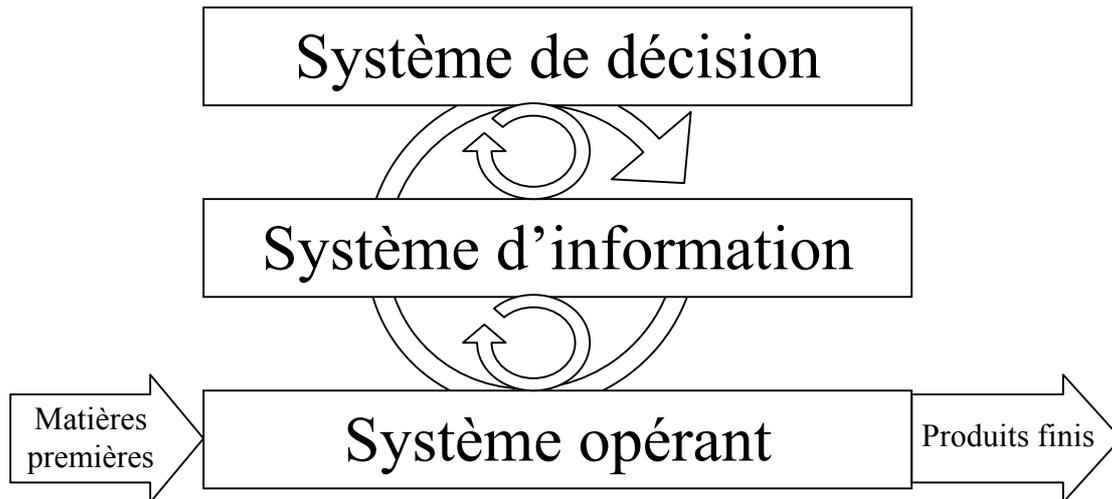


Figure II-6 Décomposition d'un système de production

Afin de comprendre les difficultés liées au processus de pilotage, nous détaillons les activités, structures et évolutions de chacun des sous systèmes constitutifs du système de production. Cette analyse va nous permettre de cerner les problèmes liés à chacun de ces sous systèmes.

II.2.2 Le système d'information

Au même titre qu'un outillage, l'information est un besoin essentiel dans la réalisation d'une tâche opérationnelle ou de décision. En d'autres termes l'information est le « savoir », alors que l'utilisation de l'information est le « faire ». Ermine dans [ERM 96] analyse les différentes théories de l'information dont deux aspects fondamentaux se dégagent : la transmission et le sens de l'information. Il propose notamment l'identification d'un processus de transmission de l'information comme la composition de trois activités :

- Traitement de l'information.
- Transfert de l'information.
- Décodage de l'information.

Si les aspects de la transmission ont été formalisés de manière rigoureuse, la question du sens reste à l'heure actuelle sans réponse car elle ne peut être détachée du contexte dans lequel on l'étudie. Nous entendons par sens, caractériser les buts et les contenus liés à la transmission d'une information. Ainsi avons nous dans notre contexte des buts et des contenus très différents si l'information concerne la prévision ou le suivi des tâches.

a) Activité

La finalité principale du système d'information est la transmission de la bonne information au bon moment. Il est très important de remarquer que la finalité n'est pas seulement la transmission d'informations mais la transmission de l'information nécessaire, suffisante positionnée dans le temps au format, codage et contenu appropriés. On retrouve donc dans l'activité de décision des activités de traitement, de transfert et de décodage de

l'information. La figure I-7 montre l'enchaînement dans le temps des activités composant la transmission de l'information. Du point de vue temporel, les notions de traitement et de codage sont peu influentes dans l'activité de transmission dans le cas de systèmes humains car elles se rapportent d'avantage aux sciences du langage et de l'information qu'aux propriétés spatio-temporelles de la transmission de l'information.

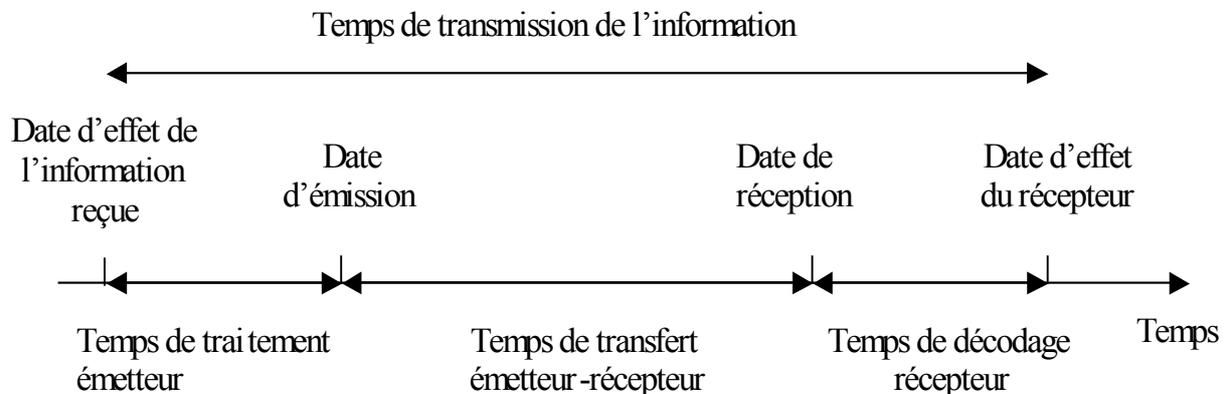


Figure II-7 Temps de transmission de l'information

A l'EIMM, l'activité de transmission des informations est réalisée par des opérateurs humains. Ces opérateurs ont en charge d'identifier l'ensemble des récepteurs concernés par une information et aucun système n'assure que l'information soit transmise à l'ensemble des récepteurs. De plus, les opérateurs traitent les informations sans moyen de savoir parmi l'ensemble des informations dont ils disposent lesquelles sont à transmettre à un récepteur particulier. C'est donc sur la faculté d'adaptation et l'expérience des opérateurs que repose la performance du système d'information à l'EIMM d'Hellemmes.

b) Structure

La structure du système d'information représente le réseau de communication, c'est-à-dire l'ensemble des moyens permettant la transmission de l'information. Cette structure décrit à la fois les moyens et les modes de communication où l'on entend par mode de communication les formes de communication, par exemple les formes par tableau noir, par appel d'offre, par médiateur, par accès direct...

De plus, l'information elle-même est structurée (notamment lorsque la transmission est réalisée entre deux machines pour lesquelles l'information n'est exploitable que si les données répondent à un certain format). La structure de l'information permet de concrétiser les buts des entités communicantes, c'est-à-dire formaliser le sens et le contenu de l'information.

Le sous système d'information présente une structure à deux axes : l'axe hiérarchique et l'axe hétérarchique. Selon l'axe hiérarchique, les informations sur le suivi de production portent essentiellement sur les modifications nécessitant la coordination des unités par le niveau supérieur. Selon l'axe hétérarchique, les informations portent sur des demandes de modification du programme entre les différents centres de décision du même niveau. La coordination se fait par consensus global lors des réunions entre les acteurs d'un même niveau et un coordinateur du niveau supérieur. Le coordinateur de chaque niveau est en premier lieu un médiateur et devient arbitre de la décision en cas d'impossibilité d'accord entre les parties. En résumé, il existe plusieurs niveaux de coordination (trois en fait : le

niveau UT, le niveau UP et le niveau établissement, cf. figure I-4), on passe de l'un à l'autre par le suivi hiérarchique. Il y a un coordinateur pour chacun de ces niveaux de coordination. Au niveau UT, le coordinateur est le chef adjoint de l'unité de production. Au niveau UP, le coordinateur est le coordinateur de production. Au niveau établissement, le coordinateur est le directeur adjoint de l'établissement.

Par ailleurs, nous avons identifié trois modes de transmission des informations différents :

- le mode par accès direct lorsqu'un centre de décision envoie une information à un autre centre de même niveau hiérarchique.
- Le mode par médiateur lorsqu'un centre de décision informe son supérieur hiérarchique afin que l'information soit répercutée vers l'ensemble des centres de décision concernés.
- Le mode par tableau noir lorsqu'un centre de décision centralise une information et la rend disponible aux autres centres de décision. La réalisation du programme de production correspond à un mode d'information par tableau noir.

Les informations concernant la production au niveau UP sont représentées par un plan de travail qui pour chaque jour donne les tâches à réaliser sur chaque engin. Ce plan de travail constitue la centralisation des informations de production. Pour les deux autres niveaux, il n'y a pas de formalisation systématique des informations, celles ci sont transmises par voie orale ou lors de réunion en attendant la modification du plan de travail le cas échéant.

c) Evolution

L'évolution du système d'information porte principalement sur la structure du système d'information, comme l'extension d'un réseau ou l'évolution du mode de communication et sur l'évolution des contenus de l'information (par exemple un système agent utilisant un protocole de communication apprend un nouveau mot). Le système d'information dépend de variables temporelles et spatiales. En effet du point de vue spatial, la transmission de l'information suggère qu'il y ait un point de départ et au moins un point d'arrivée. Du point de vue temporel, l'acheminement de l'information consomme un laps de temps entre la date d'émission et la date de réception de l'information. Toute évolution du système d'information agit alors sur les caractéristiques spatiales et temporelles de l'information.

Le système d'information à Hellemmes repose sur la communication entre les centres de décision que sont les Dirigeants d'Unité, les Adjoints au Chef de l'Unité de Production, les coordinateurs d'activité, le coordinateur de production et la direction de l'établissement. Ces centres de décision sont des personnes, possédant donc un langage articulé complexe dont les temps de codage et décodage sont négligeables. En contrepartie le but de l'information peut être déformé volontairement ou non soit par une mauvaise formulation des buts de l'information par l'émetteur soit par une mauvaise compréhension de la part du récepteur. Le temps de transfert dépend du moyen utilisé pour communiquer par exemple par voie orale, par l'intermédiaire d'un téléphone ou d'une messagerie électronique... Pour assurer la coordination nécessaire à l'accomplissement des tâches, ces personnes doivent trouver les bons récepteurs (c'est l'information directe) ou avertir le coordinateur de production, dans ce cas considéré comme un médiateur. Les problèmes liés à la circulation des informations se rapportent à l'identification des personnes à avertir, c'est-à-dire des récepteurs de l'information.

Actuellement, les informations qui circulent portent sur des problèmes opposant des unités différentes, sur la gestion des emplacements pour l'ensemble des produits, sur le respect des engagements, des dates approvisionnements. Les réunions d'UP et les réunions d'avancement sont quotidiennes, c'est le temps maximum de retour à une situation programmée après un aléa. Par exemple, si un aléa survient une heure avant la réunion UP alors cet aléa sera traité dans la journée, si le même aléa survient pendant ou après la réunion avancement alors il faudra attendre la journée suivante pour décider d'une correction éventuelle sur le plan de travail.

En conclusion, les temps de modification du plan de travail sont assez longs, de sorte qu'il peut y avoir momentanément une incohérence entre le plan et la réalité du terrain. On ne sait plus alors quand le plan de travail est en phase avec les encours et donc doit être respecté ou quand il est décalé par rapport à la réalité et donc inapproprié à la situation perturbée.

D'autre part le contenu de l'information sur le suivi de production est souvent incomplet pour faire un choix qui doit prendre en compte l'ensemble des informations nécessaires à la prise de décision.

II.2.3 Le système opérant

a) Activité

L'activité du système opérant concerne la réalisation de tâches. Esquirol et Lopez définissent une tâche dans [ESQ 99] par « une entité élémentaire de travail localisée dans le temps par une date de début, une date de fin, dont la réalisation est caractérisée par une durée et par une intensité avec laquelle elle consomme certains moyens ou ressources ». Une tâche est dite non préemptive lorsqu'il n'est pas possible de la scinder et de l'exécuter par morceaux, préemptive sinon. Une tâche fait référence à un objet précis sur lequel au moins une ressource précise réalise une opération précise à l'aide de ressources complémentaires données à un moment précis ou au moins dans un intervalle de temps déterminé. On distingue clairement l'activité de *perçage* de la tâche *percer la pièce selon le dessin technique 00061 avec la perceuse le lundi 20 janvier 2003* par exemple.

Les activités du système de production de l'EIMM sont nombreuses (pour une rame TGV en mi-vie), et pluridisciplinaires (chaudronnerie, soudure, peinture, mécanique, électronique, électricité, tôlerie, climatisation, hydraulique...) d'où des incompatibilités entre certaines tâches d'une part et d'autre part une grande diversité technique qui demande plusieurs niveaux de qualification. Les charges varient d'un engin à l'autre et la nature des travaux est quasiment spécifique à chaque engin (cela dépend de son état et des modifications déjà apportées ou non lors de précédentes immobilisations).

Il n'existe pas de documents méthodes détaillés, mais un Inventaire des Travaux d'Entretien (ITE) en fonction de l'âge de la rame ou de son potentiel pour les activités de maintenance et des Ordres de Modification (OM) selon les commandes pour les activités de modifications techniques ou esthétiques des engins. Ces documents présentent la nature de l'opération, les plans des différentes pièces et une démarche devant permettre à des personnes, d'établissements différents, avec un outillage différent, d'effectuer la même opération avec une technique qui leur est propre. Compte tenu de la nature des travaux, les méthodes employées laissent la liberté aux niveaux opérationnels d'organiser les travaux.

Ainsi trouve-t-on au sein d'un même établissement des unités qui effectuent le même travail d'une façon différente.

b) Structure

Nous considérons la structure de système opérant comme le regroupement physique au sein d'unités de travail et la mise en relation des ressources nécessaires à la réalisation des activités de maintenance. D'une manière générale, pour définir une ressource, nous parlons d'une entité nécessaire à la réalisation d'une tâche sans distinguer si la ressource est productive ou non, en considérant qu'au moins une des ressources affectées à une tâche est capable de la réaliser. En effet, nous pouvons distinguer plusieurs types de ressources, selon leur mode de consommation (ressources consommables par exemple les approvisionnements ou renouvelables comme les hommes) et selon l'énergie qu'elles peuvent déployer pour réaliser un processus (ressources productives ou non).

Le regroupement physique des ressources est réalisé par l'affectation des ressources aux centres de décision. Les liens entre ces ressources concernent les flux de matières circulant entre les ressources. Le regroupement et les liens permettent de définir entièrement la structure du système opérant. Ces liens dépendent de l'affectation des tâches aux ressources et des contraintes entre ces tâches. Pour simplifier, étant donnée une affectation, les flux matières entre les ressources correspondent à certaines contraintes entre les tâches du problème. Nous présentons donc dans le paragraphe suivant les différentes contraintes existantes mêmes si l'ensemble de contraintes ne suffit pas à lui seul pour représenter la structure du système opérant.

Une contrainte X_{ij} est formellement définie par le domaine admissible D_{ij} de l'écart entre deux variables x_j et x_i :

$$X_{ij} : x_j - x_i \in D_{ij}$$

Il existe un grand nombre de contraintes différentes. Cependant, dans l'ensemble des contraintes classiquement utilisées dans les problèmes d'ordonnancement de projet, on peut distinguer trois types de contraintes :

- les contraintes conjonctives, par exemple les contraintes de délai ou de gamme également appelées contraintes de précedence, définies par une contrainte ou par la composition conjonctive (ET logique) de plusieurs contraintes,
- les contraintes disjonctives comme les contraintes de capacité des ressources, définies par une composition disjonctive (OU exclusif) de plusieurs contraintes,
- et plus généralement les contraintes cumulatives dont la composition disjonctive est soumise aux caractéristiques de consommation des tâches sur les ressources.

Les contraintes disjonctives peuvent être perçues comme un cas particulier de contraintes cumulatives lorsque la ressource considérée est de capacité unitaire. Néanmoins certaines tâches ne peuvent être réalisées simultanément en dehors de toute considération de capacité de ressources (cas de tâches nécessitant l'isolation d'un lieux de travail pour des raisons de sécurité comme le désamiantage par exemple). De ce fait, il convient de garder une distinction claire entre contraintes disjonctives et contraintes cumulatives. Dans ce mémoire, nous parlons de contraintes disjonctives uniquement lorsque c'est la nature des tâches qui empêche leur réalisation simultanée en dehors de toute considération sur la quantité de ressource nécessaire.

La structure des ressources des ateliers de production de l'établissement d'Hellemmes correspond à une structure mixte. Certaines unités travaillent sur emplacements fixes d'autres se déplacent, certaines sont organisées par produits d'autres par métiers. Si la structure hiérarchique et la composition des unités de travail sont fixes, l'organisation du travail (les relations entre les sous parties du système et la répartition des tâches) varie selon les produits à réparer et selon les décisions prises au niveau établissement. Les agents sont considérés comme des ressources productives et dans ce cas il est possible de choisir un nombre de personne à affecter aux tâches. A l'inverse, les bâtiments, les voies ou les outillages sont des ressources non productives pour lesquelles on ne peut pas choisir la quantité affectée pour chaque tâche. Ces quantités de consommation de ressources sont définies par des contraintes.

D'une manière générale, les contraintes que nous avons pu relever sont communes à tout l'établissement et peu d'entre elles peuvent être relâchées :

- *nombre de personnes à l'intérieur d'un engin.*
- *Durée des tâches.*
- *Capacité des équipes.*

Les autres contraintes identifiées sont inviolables :

- *consignes du CHSCT¹.*
- *Contraintes de précédence entre les tâches.*
- *Capacité des ressources non productives (par exemple le bâtiment peinture).*
- *Contraintes sur les temps de transport.*
- *Respect des temps d'attente (séchage peinture, enduits, primaire...).*
- *Contraintes sur l'emplacement des engins.*

Ces contraintes imposent le séquençage des opérations en série pour les tâches nécessitant la disponibilité des engins et interdisant toute autre intervention (les travaux polluants, les essais électriques...) ou le choix des opérations effectuées simultanément sur un engin selon leur consommation en ressources. L'ensemble des contraintes et l'organisation des ressources provoquent de nombreux allers-retours des engins entre les équipes orientées par produit fonctionnant en parallèle et les équipes orientées par métier où tous les produits passent, ce qui induit des goulets d'étranglement au niveau de ces dernières. De plus, ces nombreux mouvements d'engins (sur 30 jours une remorque de TGV PSE a été déplacé 28 fois) génèrent des problèmes de sécurité, de temps de mise en place et bien entendu la difficulté de la gestion des transports augmente avec le nombre d'engin présents simultanément dans l'établissement. Aux difficultés classiques des problèmes de transports viennent s'ajouter des contraintes spécifiques liés aux engins comme la sécurité des circulation ou le partage des emplacements.

c) Evolution

L'évolution d'un système opérant caractérise la modification de l'activité ou de la structure du système. L'apparition d'aléa de production correspond à la modification des activités du système opérant induite par lui-même ou par l'environnement du système opérant

¹ Comité d'Hygiène et de Sécurité des Conditions de Travail

et peut dans certains cas provoquer l'évolution de la structure ou de l'activité du système de opérant.

Au cours de l'année 2000, un recensement des aléas a été réalisé. Ces aléas ont ensuite été classés selon les causes de déclenchement. Cette analyse a recensé 40 aléas dont les pourcentages d'apparition pour chacune des causes répertoriées sont fournies dans le tableau I-1 :

Type de problème	Pourcentage d'occurrence	Impact en jours d'immobilisations cumulés
Diagnostic erroné (durée prévue, affectation prévue)	30%	8
Coordination	11%	1
Logistique	11%	1
Modifications de charge dues à une cause externe	10%	1
Préparation des tâches	10%	3
Outillages	10%	3
Approvisionnements	10%	1
Qualité	5,5%	7
Conflits sociaux	2,5%	1

Tableau II-1 Recensement des aléas à l'EIMM d'Hellemmes

La propagation d'un aléa entre deux tâches n'intervient que si ces deux tâches sont liées, par exemple par la gamme ou par les outillages. Plus généralement, la propagation d'un aléa peut se produire si les tâches sont liées par des contraintes de ressources, de produits, de gamme, de délais, de consignes du CHSCT ou d'emplacements.

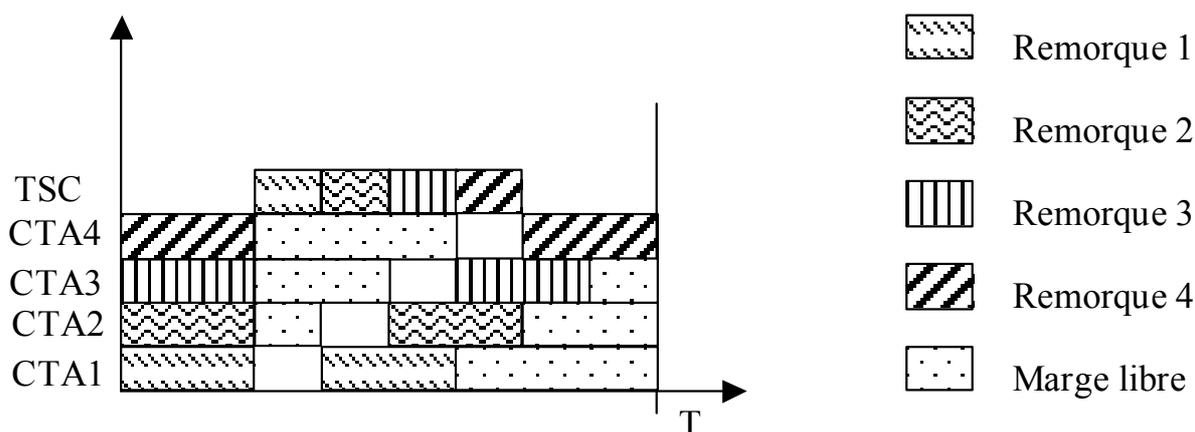


Figure II-8 Un ordonnancement avec des marges libres

Dans l'exemple de la figure I-8, on retrouve quatre ressources CTA_i organisées par remorque et une ressource métier TSC réalisant les tâches d'un certain type sur l'ensemble des remorques à maintenir. Les tâches réalisées sur la ressource TSC sont liées par une contrainte de capacité de la ressource. Tout aléa subi par une de ces tâches, s'il n'y a pas de marge libre, peut donc se propager sur les tâches suivantes. La propagation est également possible sur les contraintes de gamme de la remorque 1 puisqu'il n'y a pas de marge libre

entre les tâches successives de cette remorque. A l'inverse pour les premières tâches des autres remorques, où une marge libre est disponible, la propagation des aléas dépend de la durée de l'aléa par rapport à la durée de la marge libre. En revanche, un aléa sur la dernière tâche de la remorque 3 par exemple, ne provoquera pas de retard pour d'autres tâches.

II.2.4 Le système de décision

a) Activité

Simon a proposé dans [SIM 77] de définir l'activité générale de décision par la mise en relation de quatre activités fondamentales à travers un processus décisionnel (figure I-9). Les activités proposées par Simon concernant les processus de décision décrivent les actions locales d'un centre de décision. Le processus décisionnel d'un centre de décision est constitué des activités :

- information (« intelligence ») : activité qui consiste à surveiller l'environnement, à déclencher le besoin en décision et à rechercher l'ensemble des données nécessaires qui seront utilisées lors des activités suivantes,
- conception (« design ») : activité qui consiste à générer et à évaluer a priori l'ensemble des alternatives possibles,
- choix (« choice ») : activité de décision qui consiste à choisir, parmi les alternatives possibles et en fonction de leurs évaluations respectives celle qui convient le mieux,
- évaluation (« review ») : activité qui consiste à évaluer a posteriori la qualité de la prise de décision et à capitaliser les connaissances générées.

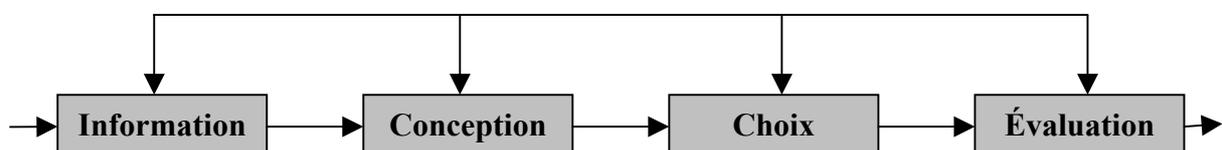


Figure II-9 Le processus décisionnel selon Simon

La notion de décision se réfère à la notion de choix. La finalité d'un système de décision repose donc sur l'activité fondamentale du choix. Néanmoins, la réalisation du choix suppose que les trois autres activités proposées par Simon soient réalisées. La réalisation d'un choix nécessite l'existence de plusieurs alternatives et donc la construction de ces alternatives. Par ailleurs, la différenciation entre les alternatives choisies, réalisées par l'évaluation des choix, et celles rejetées induit une activité soit de restriction, soit de tri soit de rangement [ROY 93]. La distinction entre le tri et le rangement repose sur la possibilité d'ex-æquo dans l'activité de rangement.

En gestion de production, l'activité de décision porte sur la réalisation de tâches nécessitant un ensemble de ressources. On entend ici par tâches les activités au sens large du système de production, comme passer les commandes aux fournisseurs ou usiner une pièce. De la même manière, les ressources représentent tout ce qui est nécessaire à l'exécution d'un travail, comme les matières premières ou les outillages. L'organisation de la production sous entend l'utilisation cohérente des ressources en fonction d'un ou plusieurs critères.

Cependant, l'organisation complète et détaillée des tâches est limitée. Cette limite est souvent difficile à évaluer car elle dépend du nombre de tâches, du nombre de ressources, des critères retenus et des contraintes entre les tâches et surtout de la classe du problème combinatoire à résoudre.

La gestion des ressources pour réaliser l'ensemble des tâches en prenant en compte les contraintes du problème est effectuée en procédant à l'ordonnement des tâches. La plupart des modèles représentant des problèmes d'ordonnement de la production sont basés sur la théorie des graphes. Parmi toutes les modélisations possibles [LAC 03], les graphes orientés potentiel-tâches non conjonctifs permettent la modélisation de l'ensemble des contraintes que nous souhaitons prendre en compte. Un tel graphe $G(V,P,D)$ est un ensemble de sommets V représentant les tâches et un multi-ensemble d'arcs orientés P constitué de paires de sommets $(i, j) = p$ où $p \in P$ représentant l'ordre imposé par la gamme de production, i est avant la tâche j et un second multi-ensemble d'arcs D constitué de paires de sommets $(i, j) = d$ où $d \in D$ représentant l'impossibilité de réaliser simultanément les tâches i et j (figure I-10).

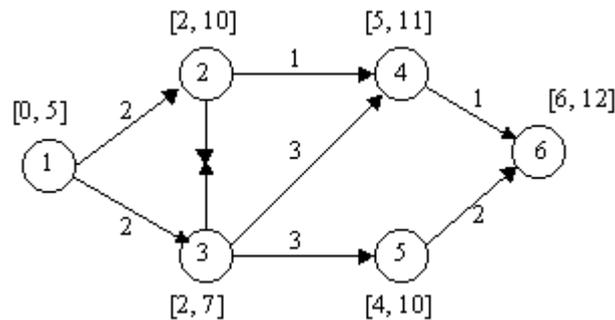


Figure II-10 Un exemple de modèle d'un problème d'ordonnement

L'arc entre les tâches 1 et 2 est une relation de précedence, c'est-à-dire que la tâche 1 précède la tâche 2, l'arc entre les tâches 2 et 3 est un arc disjonctif représentant l'impossibilité de réaliser simultanément les tâche 2 et 3.

Dans les problèmes d'ordonnement distribué l'ensemble des tâches T est réparti en plusieurs sous ensemble T_k , où k est une entité responsable du sous problème d'ordonnement des tâches $i \in T_k$, les contraintes du problème sont caractérisées par l'appartenance des tâches i et j à des ensembles identiques ou différents. Dans [HUG 94], Huguet appelle contraintes exogènes des contraintes liant des tâches i et j appartenant à des ensembles différents et contraintes endogènes les contraintes liant deux tâches i et j appartenant au même sous ensemble. Dans l'exemple de la figure I-10, considérons que le sous ensemble de tâches $T_1 = \{1, 2, 3\}$ est à la charge d'un centre de décision et le sous ensemble de tâches $T_2 = \{4, 5, 6\}$ est à la charge d'un autre centre de décision. Dans ce cas, les contraintes (2, 4), (3, 4) et (3, 5) sont appelées des contraintes exogènes. Les autres contraintes par exemple (1, 2) ou (4, 6) sont des contraintes endogènes.

Pour la production proprement dite, il existe trois activités principales du sous système décisionnel : l'affectation des charges aux unités de production, l'affectation des engins aux unités de travail, et l'ordre des tâches de chaque engin. Ces activités sont réalisées sur trois niveaux de décision différents : le niveau établissement, le niveau UP et enfin le niveau UT.

Au niveau établissement, les chefs d'unité de production se réunissent afin de répartir entre les UP les différentes charges liés aux projets acceptés par l'établissement. Cette

réunion est hebdomadaire et les prévisions peuvent faire l'objet de remise en cause selon l'évolution de la charge des unités de production.

L'affectation des engins aux unités de travail est réalisée au niveau UP afin d'assurer la coordination des équipes et le respect des contraintes (ordre des opérations, occupation des ressources ou des emplacements, gestion des transports). L'horizon de planification est la durée du cycle de maintenance de la rame (environ 50 jours ouvrés pour une opération Mi-vie rénovation ² d'un TGV Sud Est) et la période de remise en cause de la planification est quotidienne. Ce niveau a une vision « agrégée » des opérations puisque la durée moyenne des tâches considérées est de l'ordre de la journée.

Le niveau UT réalise l'ordonnancement détaillé des activités, c'est-à-dire qu'il affecte des opérations élémentaires aux agents de l'unité pour chaque journée et les place dans le temps. L'horizon de l'ordonnancement est de l'ordre de la semaine (variable selon les dirigeants d'unités et les spécificités de leurs activités) et la remise en cause se fait sur le terrain en temps réel selon l'avancement des travaux.

b) Structure

La structure d'un système de décision est l'agencement et la mise en relation de centres de décision. Chaque centre de décision a une finalité de choix, c'est-à-dire que chaque centre de décision possède une certaine autonomie qui lui permet d'exercer un choix parmi un ensemble de solutions. Par ailleurs, chaque centre de décision reçoit de son environnement extérieur un ensemble de données sur lesquelles il n'a pas d'action de choix à réaliser. La définition d'une structure de décision comprend l'affectation des variables de décision sur les centres de décision. La répartition d'objectifs ou plus précisément de critères sur les centres de décision caractérise également la structure de décision. La structure de décision reflète la décomposition du problème d'organisation des travaux sur l'ensemble des ressources. Plusieurs décompositions sont possibles.

Premièrement, le système de décision peut être articulé selon l'axe hiérarchique. Il existe donc au moins deux centres de décision tels que les variables de sortie du centre hiérarchiquement supérieur sont les variables d'entrée d'un ou plusieurs centres hiérarchiquement inférieurs lors du processus de décision. La décomposition classique des décisions selon cet axe comporte trois niveaux de décision :

- Les décisions stratégiques.
- Les décisions tactiques.
- Les décisions opérationnelles.

Deuxièmement, une décomposition hétérarchique où certaines données d'entrée et de sortie d'un centre de décision correspondent respectivement à certaines données de sortie et d'entrée d'un ou de plusieurs autres centres de décision de même niveau hiérarchique, appelés centres de décision adjacents. Dans le cas de la décomposition hétérarchique, un seul flux de décision est présent. Il s'agit des objectifs fournis par le niveau de décision amont au niveau de décision aval.

Dans le cas d'une décomposition hétérarchique, les flux de décision vont d'un centre à l'autre, représentant de cette manière l'interaction qui peut éventuellement exister entre deux centres de décision de même niveau hiérarchique.

² mi-vie : niveau de maintenance, Rénovation 2 : travaux de modification spécifiques

Le schéma de la figure I-11 représente les boucles de réaction à l'EIMM d'Hellemmes. Lorsqu'un aléa apparaît au niveau des activités de maintenance, si les agents ne peuvent pas se ré-organiser sur le terrain de manière à respecter les objectifs posés par le dirigeant d'unité, l'information concernant l'aléa est remontée aux dirigeants d'unité. Les Dirigeants d'Unité se rassemblent quotidiennement dans le cadre de réunion de suivi de production avec l'adjoint au Chef d'Unité de Production. Les problèmes abordés dans ces réunions concernent la réalisation des opérations de maintenance. Ces problèmes peuvent être liés à des problèmes de capacité des unités de travail ou à des retards d'approvisionnement à remonter au niveau UP. Les décisions prises concernent le transfert de charge momentanée à une autre unité de travail, le détachement ou le rattachement d'agents à une autre UP pour réaliser une tâche précise, les dates de début des opérations et plus généralement la coordination des agents travaillant sur les mêmes engins. Ce niveau est le niveau de décision UT et correspond aux décisions opérationnelles. Les dirigeants d'unité estiment que 15% des problèmes survenant au niveau UT ne peuvent pas être traités en fonction des objectifs et des contraintes de ce niveau (délai des activités). Dans ce cas, l'information est remontée au niveau 2 de décision.

Au niveau de décision UP (niveau 2), les adjoints aux chefs d'unité de production, un responsable des réceptions du pôle Gestion Approvisionnement et un responsable des transports se rencontrent quotidiennement au travers des réunions d'avancement animées par le coordinateur de production (SPP), pour coordonner l'ensemble des opérations de maintenance sur les engins, les approvisionnements et les mouvements des engins. Les problèmes portent sur le partage des engins dont l'accès est limité entre les unités de travail affectées à un même projet et sur les approvisionnements. Les décisions prises concernent l'emplacement des engins dans les bâtiments ou sur les voies dédiées à certaines opérations et l'affectation de créneaux d'intervention pour les unités de travail sur les engins. Ce niveau de décision correspond au niveau tactique des décisions. Les dirigeants d'UP estiment que 10% des problèmes, auxquels ils sont confrontés, nécessitent l'intervention du niveau 3 de décision pour respecter les objectifs liés à l'immobilisation des engins et aux contraintes des ressources partagées entre les UP.

Une fois par semaine, la réunion de Production (réunion P), considérée comme le niveau établissement de décision (niveau 3), regroupe les Chefs d'Unité de Production, le coordinateur de production, le chef de pôle Approvisionnement et Logistique, le représentant de GPM³ et la Direction de l'Etablissement pour traiter des problèmes de production majeurs, c'est-à-dire des problèmes de production régulièrement constatés ou des problèmes liés à des causes externes (modification de la réglementation, Noria⁴...). Ces problèmes portent sur les charges confiées aux unités de production. Les décisions prises concernent le transfert de charge d'une UP à une autre, le report ou l'avancement du début d'un projet, l'abandon de charges que l'on peut différer sur d'autres projets ou la réalisation de nouvelles charges. Ce niveau de décision correspond au niveau de décision stratégique. Certaines décisions sont remises en cause en regard des objectifs fixés par l'établissement et des contraintes liées aux projets et aux unités de production.

³ Groupe Préparation Méthodes

⁴ Modification à réaliser sur l'ensemble des engins d'un projet

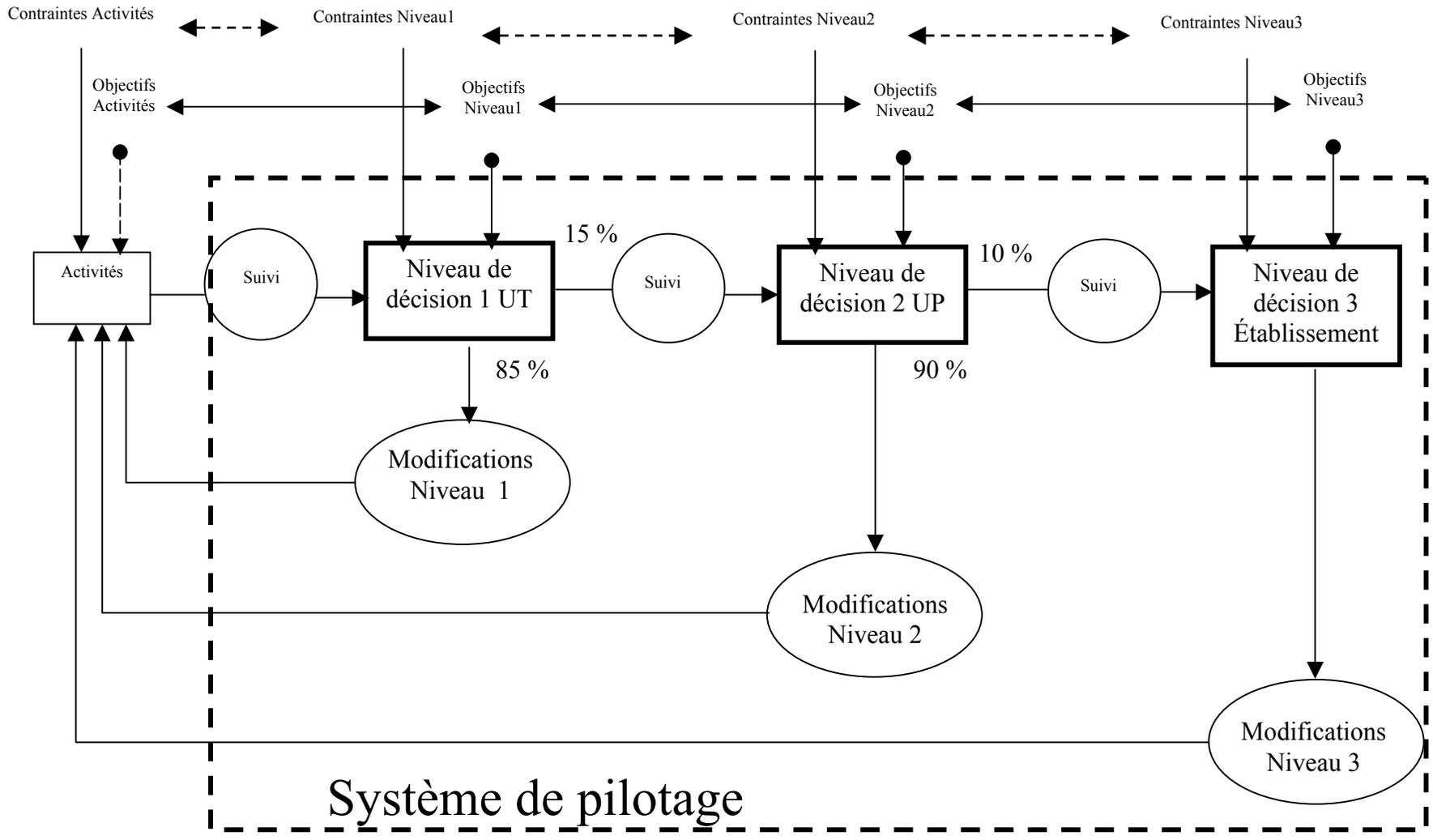


Figure II-11 Les boucles de réaction à l'EIMM d'Hellemmes

La cohérence entre le niveau UP et le niveau UT passe par l'élaboration d'un plan de travail. Celui-ci est élaboré en tenant compte de l'ensemble des contraintes, du niveau opérationnel, fournies par les responsables de production de chaque pôle au Groupe Préparation et Méthode. Le plan, une fois validé par les responsables du suivi de production, fixe les contraintes pour les niveaux de décision qui ont en charge l'ordonnancement des tâches pour chaque engin. Bien qu'il contienne un grand nombre d'informations ce plan de travail est peu ou pas utilisé au niveau opérationnel. Il arrive qu'un plan de travail ne soit pas en phase avec le déroulement des opérations au niveau opérationnel, la non-utilisation du plan provient également du fait que ce plan ne contient pas l'ensemble des tâches associées aux engins pour des raisons de lisibilité. Selon les dirigeants d'unité, il n'apporte pas d'informations complémentaires, en dehors de celles connues par expérience des agents et de celles directement observées au niveau opérationnel, pour la réalisation des opérations pour chaque engin.

c) Evolution

L'évolution des systèmes de décision concerne les modifications éventuelles des structures de décision ou l'enchaînement des activités de décision au sein d'un processus de décision. L'évolution du processus de décision concerne alors les modifications des activités fondamentales, de leur mise en relation à travers le processus décisionnel ou le changement des centres de décision concernées par un même processus de décision. Un système de décision dispose d'un certain nombre de variables de décision sur lesquelles il peut agir. Par ailleurs, il existe d'autres variables de décision sur lesquelles les centres de décision d'un certain niveau hiérarchique n'ont pas le droit d'agir. On réalise une typologie de ces variables de décision pour les problèmes d'ordonnancement en définissant la flexibilité d'un problème d'ordonnancement.

Le dictionnaire de l'APICS définit la flexibilité par : *“the ability of a manufacturing system to respond quickly, in term of range and time, to external or internal changes. [...] Robustness is the condition of a product or process design that remains relatively stable with a minimum of variation even though factors that influence operations or usage, such that environment and wear, are constantly changing”* [API 98]. La flexibilité correspond au maintien de la performance ou à la minimisation de l'écart en performance entre la solution originale et la solution proposée par un nouvel ordonnancement des tâches que l'on appelle ré-ordonnancement, alors que la robustesse se mesure par l'écart entre la performance initiale et la performance de la solution originale sur les instances modifiées du problème (pas de ré-ordonnancement proposé dans ce cas). Le groupe GOTH⁵ [BIL 04] a proposé une classification des propriétés de flexibilité d'un ordonnancement en se basant sur la nature des modifications possibles des données. Cette classification comporte les flexibilités :

- sur les temps où seules les dates effectives de début et de fin peuvent varier,
- sur les séquences de tâches où l'ordre relatif des tâches peut être changé en cours d'exécution,
- sur les ressources pour lesquelles il est possible de modifier l'affectation des ressources,
- et sur les modes d'exécution des tâches qui comprend les modifications sur les gammes opératoires, la préemption des tâches, le recouvrement de tâches...

⁵ Groupe d'Ordonnancement Théorique et Appliqué

Cette classification peut être appliquée de manière similaire aux aléas, on retrouve donc les aléas portant sur les dates, les séquences, les ressources et sur les modes d'exécution. Selon cette classification, chaque classe d'aléa est différente. Les aléas portant sur les temps sont de simples modifications de la valeur de contraintes existantes. Les aléas portant sur les séquences concernent l'ajout ou la suppression de contraintes appartenant à l'ensemble P. Les aléas portant sur les ressources concernent majoritairement l'ajout ou la suppression de contraintes sur les ensembles P et D du graphe $G(V, P, D)$. Enfin, les aléas sur les modes d'exécution concernent des modifications portant sur les trois classes précédentes.

Remarque : Chaque classe d'aléa englobe les classes précédentes (figure I-12), par exemple un aléa sur les séquences induit des aléas sur les dates de début de l'ensemble des tâches dont la séquence est modifiée. De manière similaire, un aléa sur les ressources induit nécessairement des modifications sur les séquences de tâches.

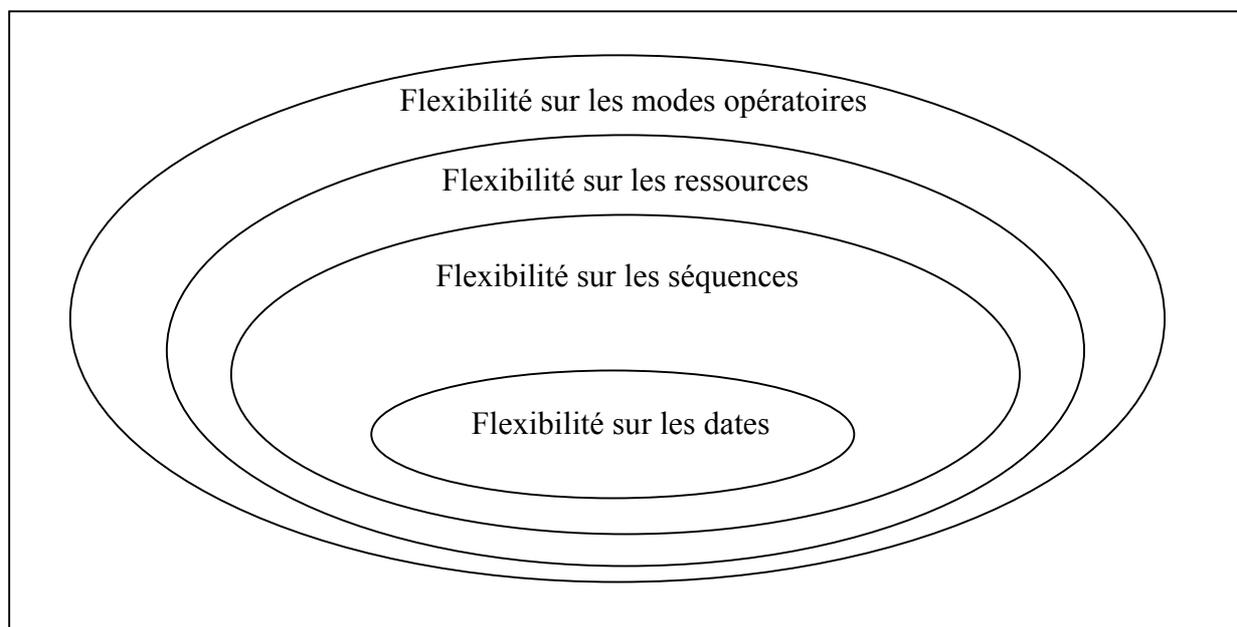


Figure II-12 Les propriétés de flexibilité selon GOTHa

Cette classification est avantageuse par rapport à des classifications portant par exemple sur la nature des tâches perturbées ou sur les aspects de localisation temporelle ou spatiale des aléas [PES 98]. En effet, il peut exister une infinité de lieux où les aléas peuvent survenir ou de dates auxquelles on les détecte. C'est pourquoi ces classifications ne permettent pas de caractériser des ensembles finis de classes. Les types de réactions à mettre en œuvre pour chaque type d'aléas sont différentes. Nous identifions les aléas rencontrés de la même manière que les tâches, c'est-à-dire qu'ils sont caractérisés par une date de début, une date de fin, la ressource sur laquelle l'aléa apparaît.

L'évolution du système de décision à l'EIMM d'Hellemmes concerne la modification du nombre ou de la mise en relation des centres de décision. En fonctionnement nominal, les centres de décision disposent des variables de décision portant sur les dates de début des tâches et sur les séquences des tâches. Mais les modifications concernant les variables de décision d'affectation des ressources aux centres de décision ou des tâches aux ressources

contribue à l'évolution du système de décision de l'EIMM. En effet, de tels changements, non prévus dans les variables de décision données aux centres de décision, consistent en terme de décision à modifier les variables de décision associées à un centre de décision et par conséquent à modifier les activités ou la structure du système de décision. Lorsqu'une rame est en rénovation, le système opérant est soumis à des variations de consommation de ses ressources (humaines ou matérielles) importantes (de la consommation au maximum de la capacité à une consommation nulle). Si les variables de décision disponibles ne permettent pas de résoudre un problème récurrent, alors le système de décision peut évoluer en modifiant l'affectation des ressources ou les modes opératoires des tâches de maintenance.

La gestion des consommations des ressources consommables (pièces) est assurée par GA, soit sur demande directe de l'unité concernée, soit sur prévision par rapport au plan de travail. Dans un cycle de maintenance, un engin est déplacé environ une fois par jour bien que la manipulation de celui-ci ne soit pas une chose aisée. Le mouvement des engins a lieu généralement en fin de journée.

La consommation des ressources renouvelables (agents, bâtiments, voies dédiées et outillages) est gérée par SPP, par chaque DU (pour les agents), et par EIS qui intervient sur les pannes machines à la demande des UP ou sur prévision pour la maintenance préventive des outillages.

II.3 Problématique du pilotage d'un système de production

Le pilotage est défini comme l'interaction des sous systèmes de décision et opérant par l'intermédiaire du système d'information. Le système de pilotage regroupe donc les fonctions nécessaires à l'élaboration finale des ordres d'exécution en direction du système opérant, qui traduisent les objectifs de production fixés par le système de décision. Deux classes de fonctions de pilotage peuvent être tout d'abord distinguées [BRO 99] :

- les fonctions de pilotage pour lesquelles la prise de décision se fait hors-ligne, c'est-à-dire avant le lancement de l'exécution. Nous appellerons ces fonctions, les fonctions de gestion de production prévisionnelle qui ont pour but de construire un planning prévisionnel détaillé de la production en fonction des produits, des marchés, des procédés, des moyens, de la charge, etc...
- les fonctions de pilotage pour lesquelles la prise de décision se fait en-ligne, c'est-à-dire après le lancement et pendant l'exécution. Nous les désignerons par fonctions de pilotage temps réel. Elles ont pour but la réalisation effective des objectifs figurant dans le planning prévisionnel détaillé.

Dans ce mémoire, nous nous intéressons aux fonctions de pilotage temps réel du système de pilotage, mais nous nous intéressons également aux fonctions de gestion de production prévisionnelles afin de comprendre leur impact sur la performance des fonctions de pilotage temps réel. Le choix des variables de description des systèmes se veut le plus générique possible, les méthodes de conception de modèles génériques de pilotage est abordée dans [TRE 01]. Trentesaux *et al.* proposent dans cet article un cadre méthodologique pour l'étude des systèmes de pilotage. Quatre processus sont développés :

- la conception du système,
- l'exploitation du système,
- l'analyse des performances,
- et l'amélioration des performances.

Nous avons choisi d'étudier dans ce mémoire les performances du système de pilotage à travers l'analyse du système de pilotage. L'étude du système de pilotage en tant que système général conduit à soulever trois problèmes.

Le premier problème concerne l'activité du système de pilotage, dont la finalité est l'adéquation entre les objectifs donnés au système opérant et les moyens de ce système. C'est un problème concernant la cohérence entre les activités de planification, pour les fonctions de gestion de production prévisionnelle, et de ré-ordonnancement, pour les fonctions de pilotage temps réel. Mais le problème lié à l'activité du système de pilotage concerne également *l'impact des décisions stratégiques sur la structure du système de pilotage* et donc sa performance.

Le second problème lié à la structure du système de pilotage concerne la répartition, réalisée à travers les activités stratégiques de pilotage, des variables de décision et la définition des critères utilisés pour évaluer la performance de chaque centre de décision. Le choix d'une structure de pilotage est en relation avec la performance des processus de pilotage. Le problème de la structure de pilotage concerne la simulation des processus de pilotage en fonction de l'activité de décision. Ce problème pose donc deux questions : *comment simuler un processus de pilotage en fonction d'une activité de décision spécifique ? Comment intégrer les caractéristiques de la structure de pilotage issues de la simulation dans l'activité décisionnelle ?*

Enfin le dernier problème s'intéresse à l'évolution du système de pilotage, c'est-à-dire à la manière dont les modifications sont réalisées. Il existe un problème de cohérence à assurer entre ce qui est demandé par le système de pilotage et ce qui peut être réalisé par le système opérant compte tenu du processus de réaction induit par la modification souhaitée. Ce problème est lié à *la mesure de la performance du système de pilotage en prenant en compte les caractéristiques de la structure du système de pilotage et les activités de décision.*

II.3.1 Activité du système de pilotage

La finalité du système de pilotage est d'assurer l'adéquation entre la prévision de l'activité des ressources à piloter et les objectifs que l'on souhaite atteindre. Cette activité peut être réalisée :

- en ajustant la production des ressources en regard des objectifs, à cette occasion on parle de pilotage d'atelier, grâce aux fonctions de pilotage temps réel,
- en ajustant les objectifs à la capacité des ressources dans le cadre du pilotage stratégique [DIN 98] à l'aide des fonctions de gestion de production prévisionnelle.

Nous entendons par activité du système de pilotage la caractérisation des variables et paramètres que le système de pilotage est capable de prendre en compte. La recherche d'efficacité, au sens de la meilleure utilisation possible des ressources pour une production donnée, commence dans les ateliers [JAC 96]. En d'autres termes, plus la prise en compte de contraintes réelles au sein d'un modèle de décision est détaillée, plus l'efficacité de la décision pourra être grande. Mais l'analyse de l'activité du système de décision a montré que la résolution de tels problèmes est limitée par la capacité des algorithmes et des calculateurs

(problèmes NP-Difficile). Les choix des variables de description et des paramètres caractérisant le système opérant concernent l'affectation des ressources aux tâches, la capacité de ressource consommée par la tâche ou la définition d'intervalle de temps pour les dates de début ou de fin des tâches.

L'APICS définit la planification par « *the process of setting goals for the organization and choosing various ways to use the organization's resources to achieve the goal* ». Nous considérons plus précisément dans ce mémoire la planification comme le choix d'un nombre de tâches acceptées pour un intervalle de temps, l'affectation des ressources aux tâches dans cet intervalle de temps et également l'affectation des ressources aux centres de décision. D'une part, le calcul des besoins en matières premières est réalisé pour chaque période en prenant en compte l'état des stocks et les consommations dans la période. D'autre part, les algorithmes de planification prennent en compte les capacités des ressources de production dans chaque période. Cependant, les contraintes de capacité quotidienne des ressources ne sont pas intégrées dans les modèles classiques de planification. Dès lors, la faisabilité des solutions proposées n'est pas garantie car le problème résolu est sous contraint par rapport aux contraintes réelles de production [ROU 97].

Les problèmes d'ordonnancement consistent à organiser dans le temps la réalisation de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement,...) et de contraintes portant sur l'utilisation des ressources requises [ESQ 99]. Baptiste dans [BAP 02] a montré que des problèmes d'ordonnancement de projet possédant au moins 30% de contraintes cumulatives sont plus difficiles à traiter à cause d'une combinatoire plus étendue et présentent des difficultés d'exploration pour les procédures classiques de séparation et d'évaluation.

Les problèmes de planification et d'ordonnancement sont liés puisque la détermination d'un ensemble de charge pour un ensemble de ressources induit un objectif de réalisation de ces charges au niveau de l'ordonnancement pour chacune de ces ressources. A l'inverse s'il n'existe pas d'ordonnancement réalisable, le calcul des charges doit prendre en compte de manière plus précise les contraintes et réajuster le plan de charge prévu. Ce bouclage entre calcul de charge et ordonnancement s'amplifie lorsque l'un et l'autre des niveaux subissent de nombreux changements. Ce problème de cohérence a été abordé de nombreuses fois par la communauté scientifique [HET 96][FON 97]. Par ailleurs, ces deux processus de décision, la planification et l'ordonnancement, génèrent également des temps de réaction dont l'impact sur le processus lui-même n'est pas négligeable. En effet, l'activité de planification, en figeant l'affectation des ressources aux tâches et aux centres de décision, définit l'ensemble des processus de réaction possibles pour réaliser l'activité d'ordonnancement.

Plus généralement, le problème est de déterminer pour chaque ensemble de ressources un ensemble de tâches pour que la performance du système de pilotage soit la meilleure possible. Ces choix d'affectation influence nettement les flux d'informations entre les centres de décision. En effet, des tâches liées par des contraintes imposent nécessairement un lien d'information entre les centres de décision pilotant la réalisation de ces tâches. C'est pourquoi l'affectation des tâches aux ressources, réalisée par l'activité de planification, détermine une structure minimale d'information entre les ressources et de ce fait complète *la structure du système de pilotage*. En outre, la performance du système de pilotage en fonction des choix stratégiques réalisés dépend des caractéristiques, du point de vue informationnel et décisionnel, de chaque entité constituant le système de pilotage

Par ailleurs le regroupement de certaines ressources au sein d'une même unité de production permet de confiner les flux d'information à une boucle de réaction locale. Cependant l'affectation d'un nombre trop grand de ressources et de tâches à la même unité de production augmente la taille du problème local à résoudre et de ce fait augmente le temps de réaction (temps de calcul grand pour les problèmes NP-difficiles) et diminue les chances de

trouver une bonne solution proche de l'optimum. Le problème d'ordonnement n'est donc pas trivial et son traitement nécessite une durée qui a elle-même un impact sur la réalisation des tâches au niveau opérationnel. La prise en compte de ces durées d'élaboration de décision ou de transfert d'information dans l'ordonnement est un facteur de cohérence de la nouvelle solution apportée. Le problème réside dans l'interdépendance entre la durée de réalisation du processus de pilotage et le sous problème qu'il a à résoudre.

A l'EIMM d'Hellemmes, la planification consiste à affecter les tâches aux unités de travail et à donner les dates d'entrée et de sortie des engins à maintenir. Cette activité décisionnelle stratégique est capitale pour la performance de l'établissement. En effet, elle définit les flux matières entre les unités de travail et les liens d'information à développer pour assurer une bonne coordination lors du ré-ordonnement.

A titre illustratif, lorsque l'on maintient un engin, il est parfois nécessaire de réaliser une pesée de l'engin afin de vérifier son équilibrage. Si le résultat de la pesée n'est pas équilibré, il est nécessaire de poser de cales pour corriger les défauts de charge soit sur les suspensions primaires, soit sur les suspensions secondaires. Au cours de l'année 2002, cette pesée était réalisée par l'unité Baie de CTA et le rééquilibrage réalisé par l'unité de travail Boggies de l'UP OMU. Cette décision avait été prise au niveau stratégique pour équilibrer les charges de travail des unités de travail.

II.3.2 Structure du système de pilotage

Le processus de pilotage fait intervenir des processus d'information et de décision. La structure du système de pilotage est composée des parties des sous systèmes d'information et de décision. Une représentation de la structure du système de pilotage, donnée dans [TAH 01] figure I-12, met en évidence l'interaction des systèmes d'information et de décision.

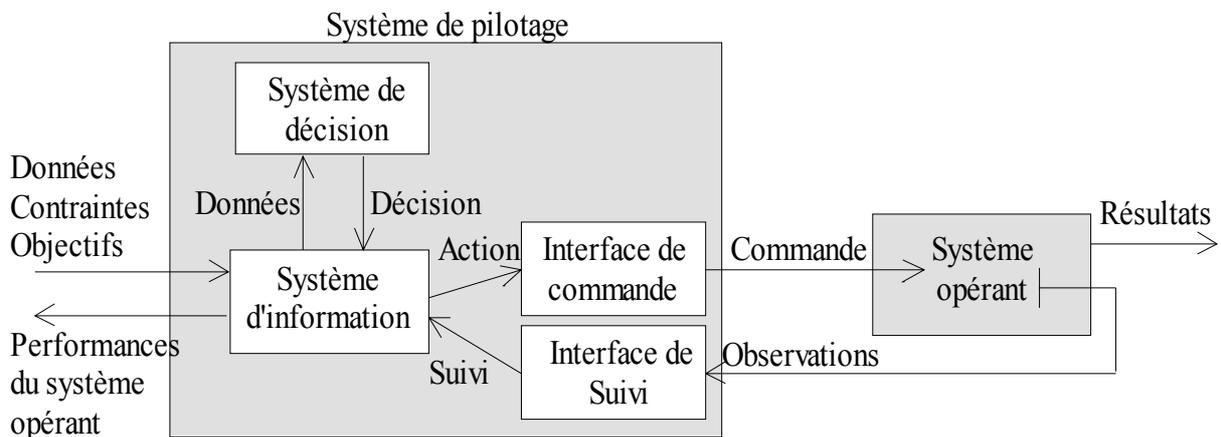


Figure II-13 Modèle d'un système de pilotage

La structure du système de pilotage global se définit par la combinaison de composition horizontale et verticale de sous systèmes de pilotage. [TRE 02] distingue dans la typologie des systèmes de pilotage qu'il propose, trois classes :

- La classe I comporte les systèmes de pilotage dont l'articulation entre centres de décision est purement verticale. Ce sont des systèmes strictement hiérarchiques.

- La classe II qui comporte les systèmes de pilotage dont la composition est verticale et horizontale.
- La classe III comporte les systèmes de pilotage dont la composition est purement horizontale. Ces systèmes sont appelés systèmes de pilotage hétérarchiques.

La structure du système de pilotage représente le nombre d'entité appartenant au système et leur mise en relation. La performance du système de pilotage est fortement liée à la structure choisie pour le système de décision. Plus clairement, la répartition des critères et des variables de décision sur l'ensemble des centres de décision est en rapport avec l'activité du système de décision et sa performance globale. En effet, la décomposition du problème global d'ordonnement en sous problèmes n'est pas indépendante de l'efficacité attendue pour le problème global.

De plus, l'affectation des tâches aux centres de décision réalisée par les activités stratégiques de décision implique des liens d'information et de décision entre les centres de décision responsable de tâches liées par des contraintes. Le processus de décision à simuler dépend fortement de l'activité du système de décision, c'est-à-dire des choix réalisés lors de l'ordonnement. En effet, chaque alternative peut nécessiter des flux d'informations et de décisions spécifiques. Le problème consiste donc à savoir comment simuler un processus de réaction qui dépend des choix pris au niveau de l'activité de décision.

L'ensemble des caractéristiques concernant les temps de transfert d'information et d'élaboration des décisions permet de déterminer le temps de réalisation du processus de pilotage. Ce sont ces caractéristiques qui sont à la base de la performance du système de pilotage. Le problème est de concilier la performance des ordonnements obtenus par *l'activité de décision* et le temps de réaction nécessaire à la réalisation du processus de pilotage. Cette performance dépend à la fois des temps de calcul et de la qualité des solutions apportées.

Du point de vue de la structure, l'exemple de l'impact de l'affectation des tâches de pesée et de pose des cales est intéressante pour illustrer l'impact des décisions stratégiques sur les performances de la structure du système de pilotage. Le choix initialement réalisé obligeait à réaliser de nombreux allers-retours entre la pesée et la pose des cales. Par ailleurs, à chaque correction de l'équilibrage, l'unité en charge de cette tâche devait modifier ces prévisions afin de réaliser les corrections attendues. Parfois, lorsque l'unité en charge des corrections d'équilibrage ne disposait pas d'agent pour réaliser la tâche, l'engin restait en attente et plus généralement les temps de mise en place de l'engin et les temps de transmission des informations venaient s'ajouter à la durée d'immobilisation de l'engin concerné. Cette organisation a provoqué de nombreux problèmes de coordination et quelques retards de sortie des engins.

II.3.3 Evolution du système de pilotage

L'évolution du système de pilotage se rapporte à l'évolution des systèmes de décision, des systèmes d'information et des systèmes opérationnels. Les systèmes de pilotage stratégiques que nous considérons sont des systèmes auto-finalisés et auto-organisés. En effet, un système de pilotage doit être capable de définir à la fois les buts à atteindre (pilotage stratégique) et les moyens à mettre en œuvre pour réaliser ces objectifs (pilotage tactique). Le système de pilotage manifeste son auto-organisation lorsque son évolution lui permet d'améliorer la performance du pilotage. L'évaluation de la performance du système de pilotage est une tâche difficile. La première difficulté consiste à établir des critères de

comparaison des systèmes de pilotage. Les critères usuels pour caractériser la performance globale d'un système de pilotage de la production concernent les résultats économiques, qualitatifs et temporels du produit ou des services à réaliser. Le triptyque coût-qualité-décalai de l'activité de production est un indicateur objectif permettant de représenter la performance du système de pilotage. Cette mesure correspond parfois aux critères objectifs de réalisation des tâches (minimisation du makespan ou du nombre de tâches en retard), mais aussi à la manière dont le système réagit en cas d'événements inattendus. Dans ce dernier cas, on parle de réactivité du système de pilotage. En effet, l'action du système de pilotage sur le système opérant est une modification d'une prévision précédente de la performance coût-qualité-décalai des prestations à réaliser. Or le temps nécessaire à l'élaboration et à la mise en place d'une telle modification n'est pas négligeable et dépend de l'activité du système opérant et de la structure du système de décision elle-même définie par l'activité de décision. Ainsi la réactivité du système de pilotage dépend-elle autant de la rapidité à laquelle on résout le problème que de la qualité de la solution apportée. Cette notion de réactivité constitue un critère de performance du pilotage du système de production.

Les propriétés du processus de réaction concernent les temps de transfert d'information connus a priori et les temps d'élaboration des décisions non connus a priori. Le problème de l'évaluation de la réactivité d'un système de pilotage se pose donc pour mesurer simultanément la performance du pilotage et les temps de réaction mis en jeu. La performance recherchée repose essentiellement sur la qualité des solutions trouvées. Mais cette qualité dépend fortement du temps consacré à l'élaboration de la solution dans le cas de la maintenance des systèmes complexes. Le dernier problème que nous soulevons est d'assurer la faisabilité d'un ordonnancement compte tenu des temps caractéristiques du sous système de décision et de l'évolution du système opérant. Un ordonnancement qui ne prend pas en compte ces temps de réaction risque de proposer une solution inapplicable dans la réalité (permutation de tâches déjà commencées...). Ce problème relève de la dynamique du système de pilotage. La gestion et l'amélioration de la dynamique du système de pilotage relève de l'évolution de ce système.

Notre objectif est donc la mesure de la réactivité d'un système de pilotage en intégrant les activités de l'ensemble des sous systèmes composant le système de pilotage afin d'identifier, parmi les caractéristiques du système de pilotage et les choix à réaliser dans les activités de décision, les éléments prépondérants dans la performance du système de pilotage. Cette mesure a pour but l'évolution de ce système en apportant des résultats les plus objectifs possibles.

Compte tenu des problèmes générés dans l'exemple de la pesée des engins, la direction de l'EIMM en accord avec les chefs d'UP concernés a modifié les affectations initialement choisies afin que la pesée et la pose des cales soient effectuées par la même unité. Les agents en charge de la pose de cales sur les suspensions primaires ont été détachés auprès de l'unité ayant en charge la pesée. Cela a considérablement amélioré le processus de pesée et la réactivité du pilotage lorsqu'il y avait des corrections à mettre en œuvre sur les suspensions primaires. L'objectif au niveau de l'EIMM est donc de mesurer la performance du système de pilotage en fonction des décisions stratégiques et des caractéristiques des entités composant le système de pilotage. Cette mesure permettra d'analyser l'impact des différentes décisions stratégiques en fonction d'une problématique et d'un système de production spécifiques.

II.4 Conclusion

Les définitions des notions fondamentales de systémique ont permis d'introduire les définitions de concept généraux utilisés dans ce mémoire. Les sous systèmes d'information, de décision et opérant ont notamment été explicités et illustrés par des observations réalisées à l'établissement d'Hellemmes.

La deuxième partie de ce chapitre a précisé la composition et les interactions entre ces sous systèmes dans le processus de pilotage de la production. Elle a permis à travers des exemples illustratifs de l'EIMM d'Hellemmes de relever les problèmes liés au système de pilotage de la production.

Enfin, nous avons montré les interactions entre l'activité, la structure et l'évolution du système de pilotage à prendre en compte pour la mesure de la performance et la cohérence du système de pilotage.

Chapitre II

Les systèmes de Pilotage de production

II.1	Structure du système de pilotage	34
II.1.1	Vue ontologique	34
II.1.2	Vue fonctionnelle	37
II.1.2.1	L'approche PCS	38
II.1.2.2	L'approche Huguet et Grabot	39
II.1.2.3	Approche par contraintes	39
II.1.2.4	L'approche Trentesaux	40
II.1.3	Vue génétique	41
II.2	Modèles des activités de pilotage	42
II.2.1	Vue ontologique	43
II.2.2	Vue fonctionnelle	44
II.2.2.1	Les algorithmes exacts	44
II.2.2.2	Les algorithmes approchés	45
II.2.3	Vue génétique	46
II.3	Spécifications pour la modélisation des systèmes de pilotage	47
II.3.1	Vue ontologique	48
II.3.2	Vue fonctionnelle	48
II.3.3	Vue génétique	48
II.4	Conclusion du chapitre	49

Chapitre II

Les systèmes de pilotage de production

Le premier chapitre a mis en avant l'objectif et le problème de la mesure de la performance d'un système de pilotage, en prenant en compte l'ensemble des sous systèmes le constituant lorsqu'il doit réagir aux modifications de son environnement.

Dans ce chapitre, nous recherchons parmi les modèles, les outils de représentation et de simulation des systèmes de pilotage proposés dans la littérature, ceux qui permettent de répondre aux problématiques présentées dans le premier chapitre. L'objectif est de mettre en évidence leur capacité à fournir des informations pertinentes pour la simulation d'un système de pilotage.

Nous cherchons, dans la seconde partie, les algorithmes permettant l'intégration de nouvelles contraintes, issues de la simulation du processus de pilotage, dans l'activité de pilotage.

Enfin, dans la troisième partie nous présentons les spécifications résultant de cet état de l'art non exhaustif et la synthèse des outils répertoriés.

II.5 Structure du système de pilotage

Les modèles de pilotage sont la représentation d'un ensemble d'entités ayant pour but le pilotage de la production. Dans cette partie, nous recherchons parmi les formalismes, représentant les structures de pilotage, proposés par la communauté scientifique ceux qui permettent de prendre en compte les aspects temporels des processus.

Dans un premier temps, nous étudions les formalismes ayant une orientation ontologique du pilotage, c'est-à-dire s'intéressant particulièrement à la modélisation des entités du système de pilotage et à leur mise en relation.

Dans un second temps, nous exposons les formalismes de la structure des systèmes de pilotage s'attachant à la mise en relation des fonctions des systèmes de pilotage.

Enfin, nous présentons les formalismes représentant les structures des systèmes de pilotage du point de vue génétique. Ces formalismes rendent compte de l'évolution des processus de décision en fonction des activités du système de pilotage.

II.5.1 Vue ontologique

Les modèles d'entreprise offrent des formalismes pour la représentation des structures de pilotage. Leur but n'est pas de fournir une analyse détaillée d'un système de production mais de fournir un cadre pour l'étude de la cohérence des fonctions de l'entreprise et notamment des fonctions de pilotage. On retrouve donc dans la plupart de ces modèles des outils de représentation des entités et de leurs relations. L'organisation peut alors être décrite à travers la formalisation des processus et leur cohérence étudiée par divers moyens qui caractérisent les différentes approches. Notre objectif est de trouver parmi ces modèles ceux qui peuvent nous fournir des moyens d'étudier la cohérence entre les processus de pilotage et les processus opérationnels.

La modélisation d'une structure de pilotage suppose l'intégration des structures d'information et de décision impliquées dans le processus de pilotage. De nombreuses références s'attachent à rendre compte de la cohérence du système de décision en l'intégrant aux systèmes d'information et de production. Les approches utilisées diffèrent selon le degré de détail avec lequel les modèles sont réalisés.

GRAI Integrated Methodology [DOU 95]

La méthodologie GIM a été développée dans le but d'intégrer les sous systèmes constitutifs des systèmes de production (figure II-1) au sein du logiciel IMAGIM. GIM repose sur l'intégration de trois formalismes :

La grille GRAI modélisant un système de décision grâce à une décomposition verticale hiérarchique et une décomposition horizontale fonctionnelle.

Les formalismes IDEF0 ou actigrammes permettant de modéliser les activités du système opérant à plusieurs degrés de détail selon le besoin de l'expert chargé de l'étude.

Un modèle entité relation appelé Réseaux Grai utilisé pour la représentation du système d'information.

La démarche proposée vise à rendre cohérent le système d'information et le système de décision à travers l'application de règles de cohérence implémentée dans IMAGIM d'une part, et le système de décision et le système opérant d'autre part. De ce fait, les concepteurs de la méthodologie soulignent que rien n'assure la transitivité de la cohérence, c'est-à-dire que la méthode ne permet pas de garantir la cohérence entre le système d'information et le système opérant. De plus, les échanges décisionnels de type coopératifs n'ont pas été prévus dans les concepts du modèle GRAI et ni les réseaux Grai ni la grille GRAI ne permettent d'extraire les données concernant la dynamique des sous systèmes. Il n'est donc pas possible d'analyser le comportement du processus de réaction en intégrant les propriétés du processus de pilotage dans l'activité de décision. Cette méthodologie ne permet donc pas d'assurer la cohérence temporelle du système de pilotage et du système opérant.

Par ailleurs, l'équipe GRAI travaille actuellement sur la définition de logistique d'information et son intégration au modèle GRAI. A l'heure actuelle, le système proposé ne permet pas de simuler les processus de décision ni d'extraire les informations relatives aux temps de transfert des informations ou d'élaboration des décisions.

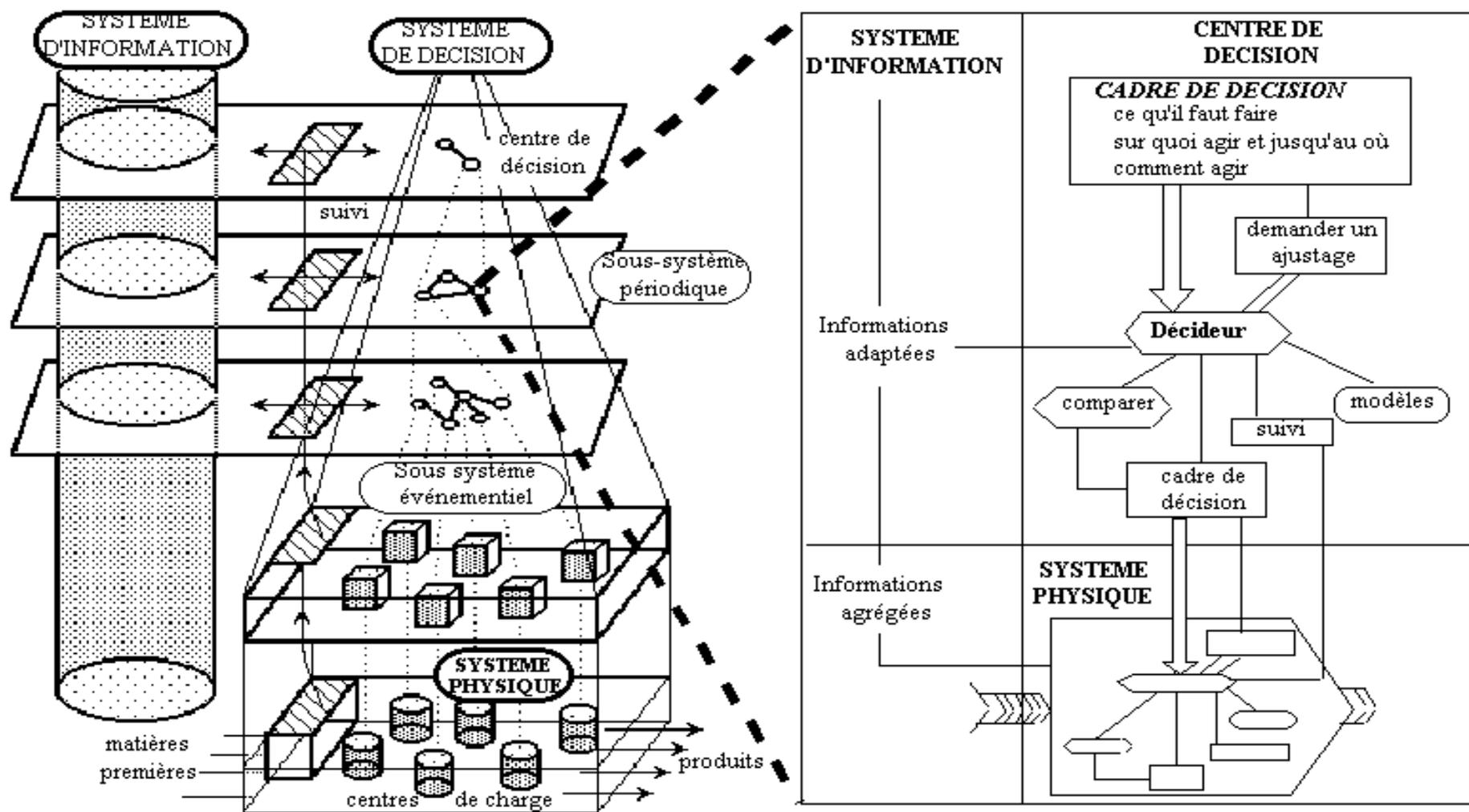


Figure 0-1 Le modèle conceptuel GRAI pour un centre de décision

- ARIS [SHE 89]

La méthode ARIS est une méthode de modélisation de processus. Elle est basée sur la décomposition de l'entreprise en quatre points de vue :

- la vue organisation,
- la vue donnée,
- la vue contrôle,
- et la vue fonction.

Chacun de ces points de vue est, décomposé en trois niveaux :

- le niveau de définition des besoins,
- le niveau de spécification de conception,
- et le niveau de description de l'implémentation.

La diversité des modèles proposés dans Aris-Tool pour formaliser un système de production est imposante (une trentaine de formalismes sont proposés dont IDEF0, UML, OMT...). La méthode ARIS permet d'analyser les systèmes de production, elle permet notamment de simuler le comportement du système opérant. Malheureusement, les processus décisionnels ne peuvent être spécifiés et l'on doit se contenter d'algorithmes de listes pour simuler l'activité de décision qui pilote le système opérant. Il n'est donc pas possible de comparer des organisations et des activités de décision sur une même problématique de production.

Pour résumer, la cohérence des systèmes de production proposée par ces outils de modélisation d'entreprise repose sur une analyse globale du système. Doumeings *et al.* dans [DOU 95] fournissent un cadre méthodologique pour l'analyse de la cohérence des flux d'information par rapport aux structures de décision étudiées. Ces cadres de modélisation permettent une analyse globale du système, mais l'étude d'un point de vue temporel sur la réactivité des sous systèmes en interconnexion n'est pas abordée. Nous nous intéressons donc à des modèles spécialisés sur le pilotage en gardant pour objectifs la possibilité de définir une structure de décision et d'en déterminer les paramètres par ailleurs utiles en vue de leur intégration dans l'activité de ré-ordonnancement.

II.5.2 Vue fonctionnelle

La vue fonctionnelle des modèles de système de pilotage représente les fonctions des systèmes d'information et de décision impliqués dans le système de pilotage. La difficulté consiste à trouver un modèle suffisamment générique pour représenter tous les centres de décision et à l'inverse de pouvoir spécifier certains comportements au niveau de chacun des centres de décision. Parmi la multitude des modèles proposés, nous avons choisi d'en présenter trois parmi les plus représentatifs du point de vue fonctionnel. En premier lieu, nous présentons l'approche PCS proposée par Archimède qui recense les fonctions du pilotage du point de vue de l'auteur. Ensuite, nous exposons une approche similaire proposée par P. Huguet mettant en avant les mises en relation des différentes fonctions du pilotage à travers des modèles de référence. Ensuite, nous présentons l'approche par contraintes pour la formalisation de la coopération entre plusieurs centres de décision. Enfin, nous présentons le

modèle de processus proposé par Trentesaux largement inspiré des activités fondamentales établies par Simon et présentée au chapitre I.

II.5.2.1 L'approche PCS

L'approche PCS développée dans [ARC 91] s'articule autour d'une organisation en boucle des activités suivantes :

- la planification (affectation des différentes opérations dans le temps et l'espace),
- le lancement (répartition et transmission des ordres en tenant compte de l'état du système de production)
- le suivi (recueil de l'ensemble des événements survenant dans le système de production)
- la réaction (correction des déviations induites par les aléas).

La figure II-2 montre un exemple de module de pilotage. Chaque centre de décision est responsable d'un ensemble de centre de décision à coordonner ou de ressources à gérer. Les formalismes utilisés ne permettent pas la simulation du comportement des systèmes de décision et d'information. On ne peut pas en extraire les paramètres de temps de réaction par rapport à un processus de pilotage quelconque. Néanmoins, cette approche permet d'identifier différents processus de réaction illustrant ainsi la diversité des processus et le problème de définition d'un modèle générique permettant de simuler l'ensemble de ces différents processus.

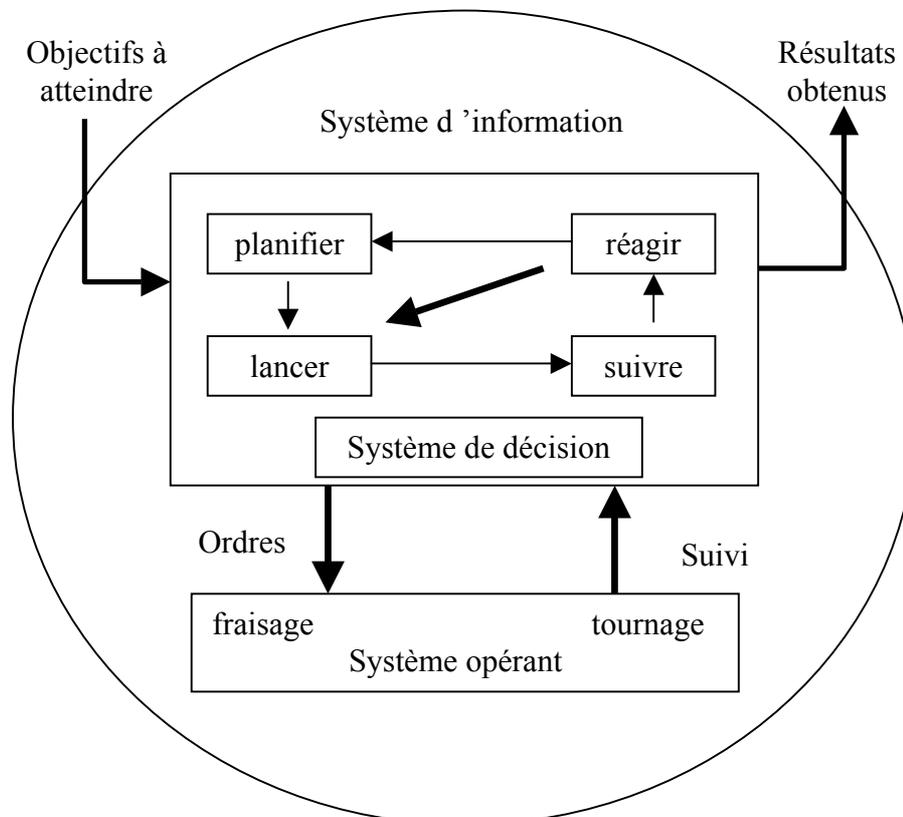


Figure 0-2 La boucle de pilotage du modèle PCS

II.5.2.2 L'approche Huguet et Grabot

Les modèles de référence proposés dans [HUG 96] permettent de représenter des structures de systèmes de pilotage à l'aide des fonctions planifier, réagir, suivre et répartir. Sept modules sont proposés selon les activités de pilotage de chaque centre de décision. Ces modules servent de base pour la conception d'une architecture de pilotage à l'aide de règles pragmatiques pour identifier les modules à associer aux centres de décision et les liens à établir entre eux. Ces outils fournissent un cadre rigoureux pour la conception des systèmes de pilotage mais les formalismes et la méthodologie mis en œuvre pour la conception du système ne permettent pas d'évaluer la performance du pilotage sur des mesures objectives.

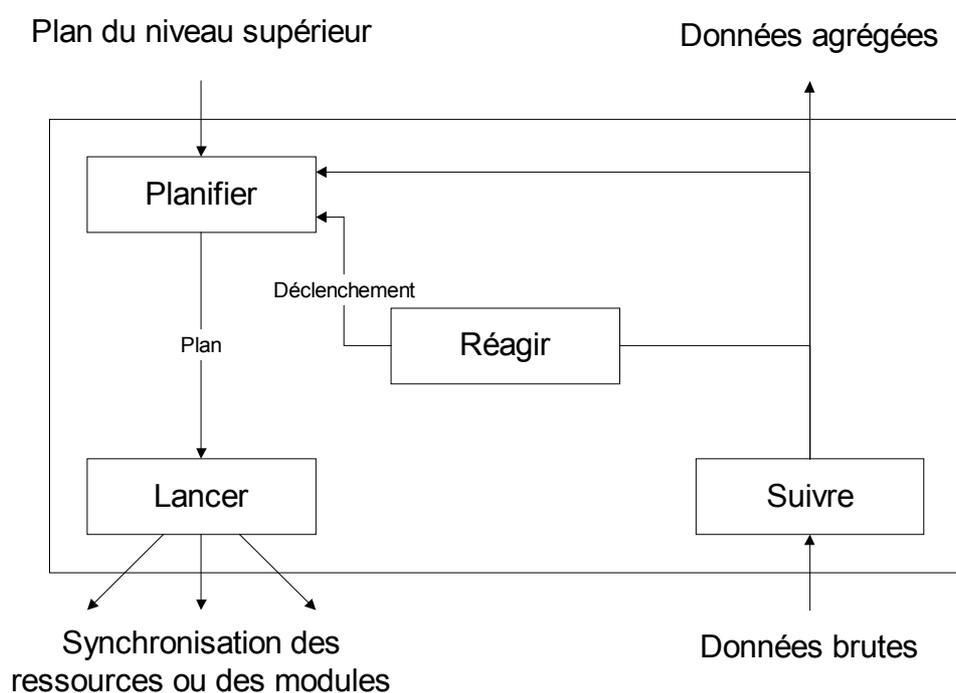


Figure 0-3 Un module de pilotage d'après Huguet

II.5.2.3 Approche par contraintes

M.-J. Huguet [HUG 94] se base sur une approche par contraintes des fonctions du pilotage et propose différents points de vue pour représenter la coopération entre deux centres de décision. L'auteur propose notamment un formalisme basé sur les réseaux de Petri pour simuler la négociation entre deux centres de décision. La structuration d'un centre de décision est basée sur trois fonctions de décision (figure II-3) :

- choix du mode visant à analyser l'autonomie disponible pour la prise de décision,
- les décisions sous contraintes visant à exploiter l'autonomie disponible explicitée,
- les décisions sur contraintes visant à réguler l'autonomie, en interne ou en coopération avec d'autres centres de décision.

Cette approche est très intéressante, notamment pour distinguer les décisions nécessitant la coordination ou la coopération avec d'autres centres de décision. Cependant, le formalisme utilisé pour la modélisation des négociations entre centres de décisions ne fournit pas la diversité nécessaire pour représenter la diversité des réactions possibles entre plusieurs centres de décision.

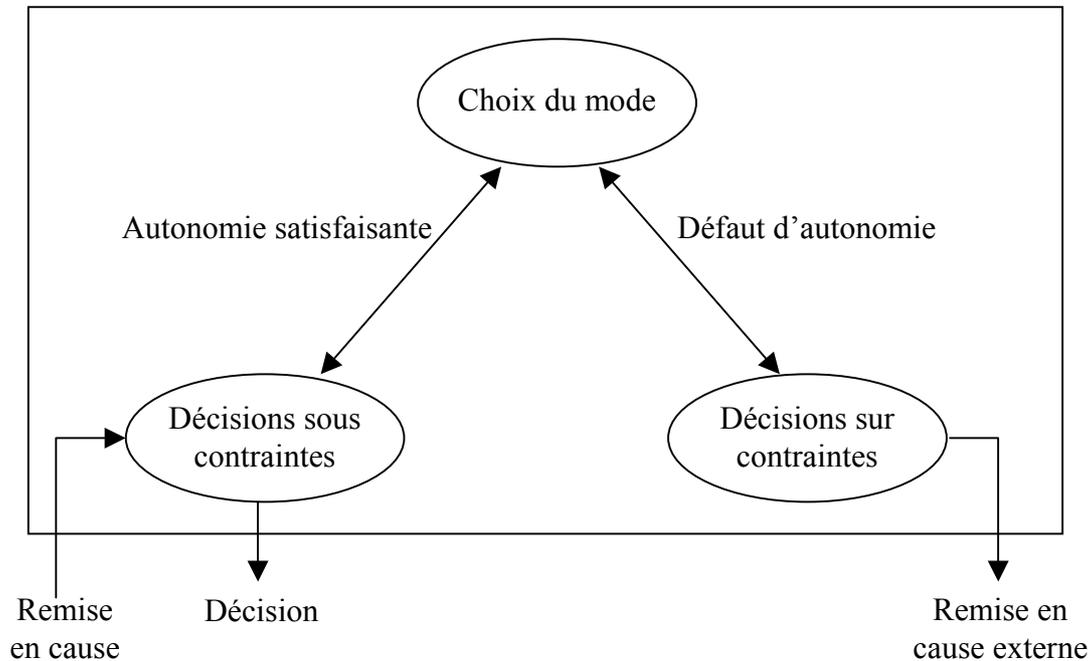


Figure 0-4 Fonctions de décision pour un centre

II.5.2.4L'approche Trentesaux

Les modèles utilisant les réseaux de Petri pour décrire les systèmes de production ou les systèmes de décision sont nombreux. Tahon et Trentesaux [TAH 01] utilisent un modèle de processus fondé sur les processus de décision proposés par Simon (figure II-4) et l'intègrent dans la structure du système de décision en se basant sur le formalisme des réseaux de Petri. Le modèle offre une structure générique pour les centres de décision, il intègre les activités fondamentales d'un processus de décision proposé par Simon (Renseignement, Conception, Décision, Evaluation) et les activités liées au pilotage des systèmes de production (Déclenchement, Application). Ce modèle permet également de différencier les connexions d'information locales des connexions d'informations globales.

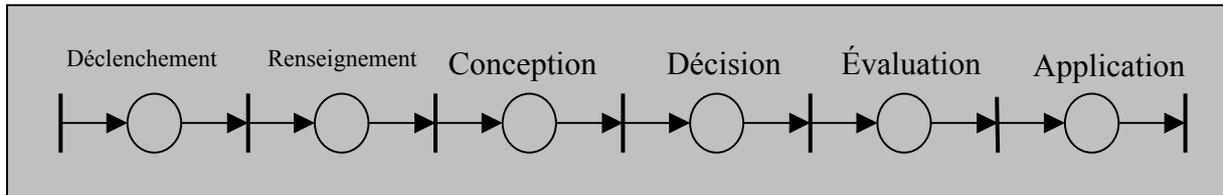


Figure 0-5 Modèle générique d'un centre de décision

Les connexions locales sont réalisées par synchronisation directe des centres de décision de niveau hiérarchique équivalent. Alors que les connexions globales font intervenir un centre de décision de niveau hiérarchique supérieur soit pour l'arbitrage des décisions soit pour la définition des objectifs des centres de décision qu'il contrôle, il y a alors une décomposition de la décision (cf. figure II-5).

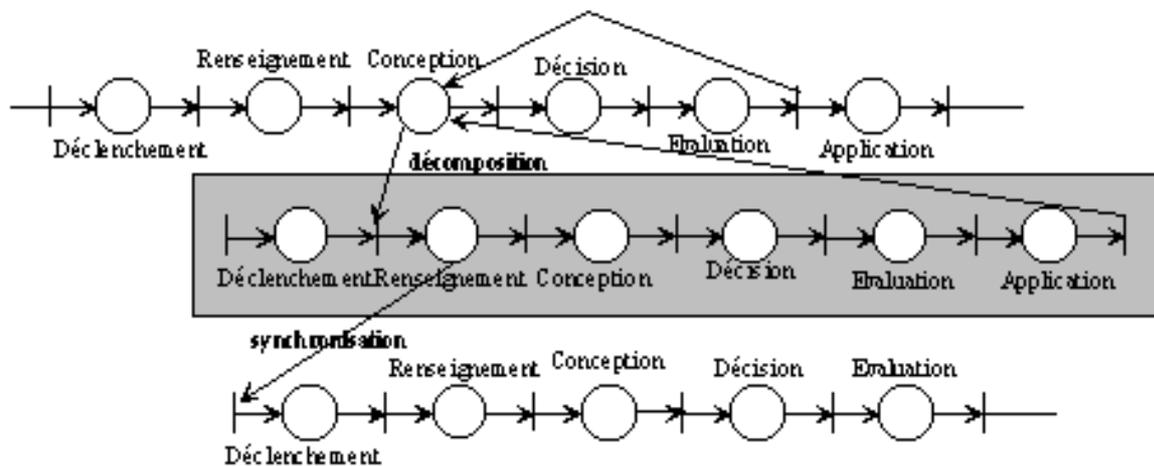


Figure 0-6 Un exemple de processus selon [TREN 01]

L'utilisation des réseaux de Petri colorés temporisés permet de prendre compte la complexité des sous systèmes étudiés et confère au modèle un aspect dynamique du fait de la temporisation et de la possibilité de valuer dynamiquement les arcs du réseau [DAV 92]. Ces modèles ont un double avantage : leur richesse permet de particulariser des comportements conditionnels (Si... Alors) ou logique (ET, OU, NON) et leur utilisation reste simple. Les modèles issus des formalismes de réseau de Petri permettent la simulation d'un processus de décision et d'en extraire les caractéristiques.

II.5.3 Vue génétique

Nous considérons la vue génétique des modèles de structure de pilotage comme l'évolution des relations entre les entités d'un système de pilotage en fonction des modifications de leur environnement.

Les modèles de négociation ou de coopération s'intéressent particulièrement à l'évolution des relations entre les entités d'un système de pilotage. La négociation et la coopération dans les systèmes de décision a été traitée dans de nombreuses références [HUG 94][CAM 00][COU 00] [MON 01]. Ces modèles de négociation ou de coopération sont la

plupart du temps formalisé avec les réseaux de Petri. De plus, la remise en cause des décisions de planification en fonction de l'avancement du processus de négociation est possible. Cependant, ces approches ne prennent pas en compte les interactions entre le processus d'ordonnement et le processus de décision.

L'impact des temps de réaction induit par la structure de décision sur le processus d'ordonnement a été montré dans [LEQ 03a]. Le principe est de vérifier dynamiquement la faisabilité des solutions de ré-ordonnement au cours du processus de décision. En effet, le processus de décision apporte des contraintes de délais supplémentaires aux problèmes d'ordonnement notamment lorsque des permutations de tâches dans les séquences de l'ordonnement initial sont demandées. Les problèmes de contraintes de temps de communication, intégrées dans l'activité de décision, sont également très présents dans la littérature concernant les ordonnements multiprocesseurs [HAN 99][MOU 99][MOH 96]. Toutefois ces problèmes diffèrent légèrement du problème étudié dans la mesure où les temps mis en jeu dans notre contexte dépendent fortement du processus de pilotage lui-même. C'est le cas en particulier des temps de prise de décision directement liés à la difficulté du problème considéré. Alors que dans les approches classiques d'ordonnements distribués et notamment dans le domaine de l'ordonnement multiprocesseurs les temps mis en jeu sont connus par avance et ne dépendent pas des activités de décision.

En conclusion, la présentation de certains formalismes pour la modélisation des systèmes de pilotage a mis en avant les manques des modèles proposés pour prendre en compte l'aspect dynamique des interactions entre les systèmes d'information, de décision et de production. L'aspect dynamique est nécessaire tant du point de vue des processus de décision et d'information qu'au niveau de l'élaboration des ordonnements.

Par ailleurs, il est nécessaire d'intégrer les temps consommés par le processus de réaction dans l'activité de décision. Le processus de réaction doit prendre en compte les influences en terme de coût qualité délai qu'il occasionne sur le processus de fabrication lors de sa réalisation. La commande envoyée par le système de pilotage, c'est-à-dire la solution choisie, doit prendre en compte l'évolution du processus de fabrication, la réalisation du nouvel objectif et l'état du système opérant.

II.6 Modèles des activités de pilotage

Dans cette partie, nous présentons successivement, dans une démarche systémique, les vues fonctionnelle, ontologique et génétique des activités de pilotage.

La vue ontologique permet de décrire la mise en relation des activités du système de pilotage.

La vue fonctionnelle correspond aux modèles permettant de réaliser des activités du système de pilotage.

Enfin, la vue génétique concerne l'évolution des activités de pilotage visant à améliorer la performance du système de pilotage.

II.6.1 Vue ontologique

a) Méthodes agrégatives

L'agrégation de données consiste en quelque sorte à encapsuler les données d'un niveau inférieur dans une macro-donnée afin de résoudre le problème de planification en prenant en compte davantage de données sans en augmenter la complexité. Le problème lié aux organisations agrégatives est de définir des ensembles de tâches qui seront agrégés. Ce regroupement dépend fortement des contraintes entre les tâches. Un regroupement qui conduit à une planification cohérente induit que les tâches d'un même groupe n'ont aucune contraintes de capacité de ressource en commun. Dans le cas inverse, la planification conduit nécessairement à sous contraindre le problème puisque certaines contraintes de capacité ne sont pas prise en compte dans la planification. Pour pallier à ces problèmes, les méthodes agrégatives font intervenir un coefficient d'exécution appelé « execution ratio » chargé d'assurer un rapport cohérent entre la charge et la capacité des machines quelque soit le niveau de décision [ZOL 98]. Ces approches se révèlent efficaces dans des problèmes particuliers où la répartition des tâches au sein des groupes ne fait pas apparaître de contraintes entre les différents groupes, c'est-à-dire où le coefficient d'exécution est proche de 1, dans le cas contraire une approche par simulation pour évaluer le bon coefficient d'exécution s'avère nécessaire.

b) Méthodes hiérarchisées

La méthode hiérarchisée consiste à définir différents niveaux de décision. Le découpage classique entre les décisions d'ordre stratégique, tactique et opérationnel hiérarchise les décisions. La planification utilisée aux niveaux stratégique et tactique détermine les contraintes ou les objectifs à réaliser pour les niveaux de décision inférieurs. Aux niveaux tactique et opérationnel, on retrouve les problèmes d'ordonnancement avec les objectifs et les contraintes calculées par la planification. Cette organisation est très coûteuse tant du point de vue du temps que du point de vue de la qualité des résultats. En effet, la cohérence des différents niveaux de décision nécessite de nombreux bouclages entre les niveaux où les décisions sont remises en cause et les calculs entièrement à refaire. Par ailleurs, les niveaux de décision n'étant pas intégrés, la direction de recherche de solutions au niveau de la planification n'est pas orientée vers une solution satisfaisante pour le niveau ordonnancement. Certaines organisations ne se soucient pas de la cohérence entre les niveaux. Les incohérences planifiées sont remises en cause au moment où elle sont détectées (approches MRP). Dans ces conditions, les temps nécessaires à la planification et à l'ordonnancement sont raisonnables mais la performance calculée n'est pas garantie puisque la solution proposée n'est pas nécessairement applicable sur le terrain. De plus, ces approches génèrent beaucoup de problèmes sur le plan social (on donne des objectifs irréalisables sur le terrain) et sur le plan organisationnel où la cohérence entre les niveaux de décision n'est pas assurée par ce type d'organisation.

c) Méthodes intégrées

Les approches de la planification et de l'ordonnancement intégrés ressemblent aux approches agrégées. La prise en compte des variables d'affectation et des variables de dates de début des tâches de manière itérative constitue la problématique fondamentale de l'ordonnancement [DAU 92]. Le niveau planification résout d'abord le problème de l'affectation des tâches, puis l'ordonnancement calcule une séquence en fonction de cette

affectation. Le problème remonte sur la partie planification avec les séquences calculées par l'ordonnancement figé. De cette manière, le niveau de planification possède les informations relevant de la capacité des ressources puisque la séquence calculée au niveau de l'ordonnancement est une solution à ces contraintes de capacité. La convergence de telles méthodes est bonne car la recherche de solution au niveau de la planification est orientée par les résultats obtenus au niveau de l'ordonnancement. Cette approche s'applique particulièrement bien sur des problèmes de type Job shop.

d) Systèmes multi-agents

Le concept de système multi-agents défini dans [FER 95] repose fortement sur les notions de communication entre des entités autonomes appelées agents. Un système multi-agents est un système composé d'entités qui peuvent être des agents réactifs ou des agents cognitifs. Chaque agent du système est autonome, il est doté des moyens de communication qui lui sont nécessaires pour la communication et l'échange d'informations avec les autres agents du système. Les organisations reposant sur des systèmes multi-agents avec des agents réactifs se rapprochent en terme de résultats des algorithmes de liste. Par exemple, un système où les agents réactifs sont les ressources, à chaque nouvelle tâche les agents communiquent selon le protocole prédéfini pour affecter la tâche à un agent. Cette affectation est généralement réalisée à partir de règles telles que le premier agent disponible prend la tâche en charge [COU 00] ou à partir de règles plus complexes comme le *Contract-Net* [SMI 80]. Dans tous les cas, les approches multi-agents avec des agents réactifs se comporte comme les algorithmes de liste, c'est-à-dire que la méthode utilisée est myope puisqu'elle ne s'intéresse pas aux liens que les tâches ont entre elles sur toute la durée du projet et notamment à la coordination nécessaire de certaines tâches afin de minimiser l'attente des ressources.

Dans le cas des systèmes multi-agents avec des agents cognitifs, l'approche diffère quelque peu du cas précédent. En effet, il est possible de réaliser des traitements sur une partie du problème posé [ARC 99]. Par exemple, ce traitement peut porter sur un ensemble de tâches utilisant la même ressource pour lesquelles le traitement réalise une séquence. Mais là encore, la coordination de tâches affectées à des agents différents pose problème [LIU 95]. Si les agents se coordonnent cela revient à résoudre le problème globalement et dans ce cas le nombre d'itérations nécessaires peuvent s'avérer nombreuses et les temps de calcul très longs. Si les agents ne se coordonnent pas, la qualité de la solution n'est pas garantie.

II.6.2 Vue fonctionnelle

La finalité des outils et des algorithmes en gestion de production est de proposer une solution respectant l'ensemble des contraintes posées dans le modèle. Les méthodes pour élaborer les solutions respectant l'ensemble des contraintes peuvent être exactes (solution optimale) ou approchées. Nous présentons ci-dessous les deux types de méthodes et le principe des algorithmes correspondant.

II.6.2.1 Les algorithmes exacts

a) Procédure par séparation et évaluation

Les méthodes par séparation et évaluation sont des méthodes arborescentes dont le principe général est l'énumération intelligente de l'espace des solutions [LAC 03]. Le but de la séparation, à chaque étape de l'algorithme, est donc de séparer le problème en sous

problèmes de plus en plus petits en fixant une ou plusieurs variables de décision. En réalité, l'énumération des sous problèmes n'est pas complète car à chaque étape de l'algorithme l'évaluation pratiquée compare les bornes de chaque sous problème et supprime les sous problèmes dominés. L'amélioration de ce type d'approche repose généralement soit sur l'amélioration du choix des branches à explorer, c'est-à-dire l'amélioration de la stratégie de recherche, soit sur l'amélioration de la propagation des contraintes, c'est-à-dire sur l'amélioration des bornes inférieures et supérieures de chaque sous problème. Cependant, les procédures par séparation et évaluation se heurtent rapidement à l'explosion combinatoire des problèmes considérés dans notre étude.

Le modèle de centre de décision proposé par [HUG 94] suggère de classer les décisions en deux types. Le premier est la décision sous contraintes. Le centre de décision est responsable d'un certain nombre de tâches soumises à des contraintes exogènes et endogènes. Les décisions sous contraintes sont les décisions portant sur les contraintes endogènes du centre de décision. Le centre de décision peut donc remettre en cause les contraintes établies à son niveau. Le second type de décision concerne les décisions sur contraintes où le centre de décision peut demander la remise en cause des contraintes exogènes du problème, c'est-à-dire les contraintes qui lui ont été données par d'autres centres de décision. Cette analyse sous contraintes repose sur les règles de propagation utilisées dans les procédures par séparation et évaluation. En cas d'inconsistance révélée par l'analyse sous contraintes, le centre de décision s'accorde le droit d'agir sur les contraintes, ce qui correspond à demander aux centres de décision avec lesquelles il est lié des modifications sur les contraintes qui lui sont données.

b) Programmation linéaire

En programmation linéaire, il existe des méthodes de calcul d'ordonnement basées sur une performance moyenne d'un ordonnancement par rapport à un ensemble exhaustif de scénarii possibles [KOU 97]. Or pour le cas des problèmes NP-difficile, les algorithmes de programmation linéaire en nombres entiers sont d'une complexité trop importante pour espérer résoudre ces problèmes lorsque les instances dépassent une certaine taille [LEQ 02b]. Le recours à la dualité n'est pas avantageux puisque les nombres de variables et de contraintes sont du même ordre. Par ailleurs, l'utilisation de la programmation linéaire pour résoudre le problème de planification sous contrainte le problème puisque certaines données du problème ne sont pas prises en compte (par exemple la capacité quotidienne des ressources). Pour remédier à ce constat, plusieurs méthodes ont été apportées [HEN 97]. Ces méthodes reposent sur le calcul itératif, intégré ou agrégé de la planification et de l'ordonnement. Elles se différencient sur la part du problème d'ordonnement traité. Cette part peut être complète dans le cas des méthodes hiérarchisées ou partielle dans le cas des méthodes agrégatives ou intégrées [HET 96].

II.6.2.2 Les algorithmes approchés

L'utilisation de méta-heuristiques pour la résolution de problèmes d'ordonnement réactif, et particulièrement des algorithmes génétiques, a été présentée dans [SEV 02]. La méthode montre la possibilité d'évaluer une solution sur un critère objectif standard et sur un critère robuste selon lequel les instances sont modifiées par les aléas de production. L'évaluation robuste est la moyenne d'une centaine d'instances dont les modifications sont réalisées par tirage aléatoire. Cette méthode permet de proposer, dans des temps de calcul raisonnables (de l'ordre de la minute), des performances acceptables (5% de l'optimum) dans le cas de l'évaluation régulière et une garantie de résultats dans le cas de l'évaluation robuste. Cependant, les auteurs ont exprimé leur intérêt de pratiquer une évaluation robuste sur des

aléas connus afin d'une part de prendre en compte des événements attendus et aussi de permettre la diminution des temps de calcul, l'évaluation robuste ne se faisant plus sur une centaine de tirage aléatoire mais sur un ensemble de scénarii connus a priori. En effet, la garantie de résultat n'est réelle que si l'aléa survenu a été pris en compte dans l'évaluation robuste. Or prendre en compte l'ensemble des aléas est impossible puisque ceux ci sont de nature très variée et non connue par avance. Les méta-heuristiques offrent un cadre générique pour l'amélioration de solutions applicables à tous types de problème. Par ailleurs, il existe des algorithmes de construction que l'on applique à certains problèmes seulement. Ces algorithmes sont appelés des heuristiques, c'est-à-dire qu'ils proposent une méthode permettant la construction de solutions sur un problème spécifique.

Parmi les heuristiques les plus connues, on retrouve les algorithmes de listes. Ces algorithmes sont de nature très variée mais reposent tous sur le principe de priorité entre les tâches. Certains dressent une seule liste, où les tâches sont triées par rapport à une règle (EDD, SPT) et d'autres créent et actualisent la liste au fur et à mesure que l'ordonnement est construit. Ces derniers proposent une méthode permettant de piloter dynamiquement la production d'une ou de plusieurs ressources en fonction de l'avancement des travaux. En revanche, il est difficile de coordonner l'exécution de plusieurs tâches et la méthode est myope. Généralement, ces algorithmes de complexité limitée (souvent en $O(n)$ ou $O(n^2)$) proposent des ordonnements dont la performance moyenne est approximativement égale à 20% de l'optimum (inférieure par ailleurs à la performance d'une solution apportée par un opérateur humain) dans des temps de calcul très courts.

II.6.3 Vue génétique

L'évolution d'un système de pilotage est guidée par la recherche de l'amélioration de ses performances. Nous avons déjà vu qu'un certain nombre de paramètres interdépendants (choix réalisés par l'activité de décision en fonction des temps de réaction, temps de réaction associés au choix) entrent en jeu dans les processus de pilotage de la production. Ces paramètres concernent la performance atteinte sur un ou plusieurs critères et le temps nécessaires pour l'obtenir. Pour améliorer la performance des solutions obtenues et les temps de réaction, il est possible d'agir directement sur ces paramètres soit par l'amélioration d'un algorithme d'ordonnement, soit par l'amélioration des flux d'information et de décision. Mais, il est également possible de travailler sur les propriétés de robustesse des solutions et sur les propriétés de flexibilité des ordonnements rencontrés. La notion de robustesse intervient a priori, c'est-à-dire que le but est d'anticiper de possibles aléas en proposant une solution dont la performance n'est que très peu affectée par les perturbations. De nombreux travaux ont été proposés dans la littérature sur les définitions et les applications de flexibilité et de robustesse [BIL 04]. Si les définitions de flexibilité et de robustesse diffèrent quelque peu selon chaque auteur, on retrouve certains points communs. On peut notamment différencier les approches qui fonctionnent sur des ensembles de scénarii connus par avance [KOU 97], de celles qui fonctionnent sur un scénario de départ soumis à des aléas quelconques [LEQ 03b][SOR 03].

La flexibilité correspond à la réactivité des algorithmes ou plus généralement du processus de pilotage ou à la possibilité qu'offre le problème d'ordonnement de réaliser des modifications sans altérer la qualité de la solution (cf. Chapitre I.2.4.c). L'utilisation de méta-heuristiques pour la résolution d'ordonnement robuste a été présentée à la section 2.1.2 de ce chapitre. D'autres approches basées sur des méthodes stochastiques et la logique floue ont été apportées par [HER 04], ces approches montrent des résultats intéressants en

terme de robustesse, notamment pour des problèmes d'ordonnancement avec des critères réguliers tel que le makespan. Toutefois, deux problèmes se posent. Premièrement, la structure des données et l'évaluation des différentes valeurs attendues génère une augmentation de la combinatoire du problème. En effet le modèle choisi doit correspondre avec ce qui peut arriver d'où un grand nombre de possibilités différentes (voir même une infinité) et d'autre part la performance de la solution sera fortement guidée par la structure de pilotage choisie. Deuxièmement, ces approches n'offrent pas de réponse au problème de la réactivité du système de pilotage : lorsqu'une solution doit être profondément modifiée les algorithmes stochastiques donnent de mauvais résultats compte tenu de la combinatoire élevée qu'ils génèrent et des temps de calcul induits.

II.7 Spécifications pour la modélisation des systèmes de pilotage

Nous présentons dans le tableau II-1 la synthèse des méthodes présentées dans ce chapitre par rapport à notre problématique.

	Simulation des processus en fonction des activités	Intégration des activités de décision et de la simulation	Intégration des caractéristiques de simulation dans les activités	Intégration progressive
GRAI				
ARIS				
PCS				
Huguet				
Trentesaux				
PSE				
PL				
Méta-heuristiques				

Tableau 0-1 Synthèse des apports de la communauté scientifique

Ce tableau nous amène à présenter les spécifications liées à la modélisation du système de pilotage dans l'optique de mesurer sa performance.

En premier lieu, nous abordons les spécifications relatives à la modélisation et à la simulation du système de pilotage.

Nous présentons donc dans la deuxième section de cette partie, les spécifications liées aux activités du système de pilotage.

Puis dans la dernière section, nous posons les conditions nécessaires à la mesure de la performance du système de pilotage.

II.7.1 Vue ontologique

Le point de vue structurel de la réactivité repose sur la structure du système d'information et du système de décision. Les propriétés de la structure d'information concernent les temps de transfert et la répartition des liens hiérarchiques entre les centres de décision. La part de la structure de décision qui nous intéresse est la répartition des variables de décisions et des critères sur les centres de décision, c'est l'organisation du système de décision.

La méthode pour évaluer la réactivité d'un système de production doit donc permettre de simuler différentes configurations de structure d'information et de décision. Le critère d'évaluation pour de telles structures doit concerner la qualité de la solution globale en fonction des solutions locales et de la structure du système de pilotage. Parmi, les modèles répertoriés, ceux basés sur les réseaux de Petri permettent la simulation et l'extraction des données relatives au processus de pilotage.

II.7.2 Vue fonctionnelle

L'amélioration de la réactivité du point de vue fonctionnel repose sur l'amélioration des processus de décision. La réactivité du système de production est affectée par le temps de calcul si celui-ci excède une quantité dépendante des variables caractérisant une perturbation. Les algorithmes de résolution doivent donc donner de bonnes solutions dans un temps de calcul qui dépend à la fois de la taille, des instances du problème à traiter et de la perturbation en cours.

Donc pour connaître le temps imparti à l'algorithme de calcul celui-ci doit être réalisé itérativement avec la simulation du processus de pilotage, les processus étant dépendants.

Par ailleurs, les modèles et outils d'ordonnancement et de planification doivent permettre l'intégration progressive de nouvelles contraintes, pour le cas des temps de réaction dynamiques comme les temps d'élaboration des décisions, résultant de la simulation du processus de pilotage. De ce point de vue les algorithmes par séparation et évaluation sont utilisables. Les autres algorithmes nécessitent le redémarrage de la procédure de recherche dès qu'une nouvelle contrainte est apportée si le temps de calcul est significatif par rapport à l'unité de temps considérée dans le modèle.

II.7.3 Vue génétique

La réactivité dans [HAC 00] est une conduite marquée par la rapidité et l'efficacité. Dans les définitions apportées par [BAI 94][CAM 95], ces deux critères de rapidité et d'efficacité apparaissent. Or, dans le cas du processus de pilotage, ces deux notions sont fortement dépendantes et parfois contradictoires, notamment dans le cas de la résolution des problèmes NP-difficiles auxquels nous avons à faire. La réactivité d'un système de production est sa capacité à proposer des solutions performantes pour répondre aux modifications des instances initiales. Mais généralement, les solutions proposées ne tiennent pas compte des temps de réaction, pendant lesquels le processus opérant évolue, et donc de l'état réel dans lequel sera le système opérant au moment où la nouvelle solution sera mise en œuvre. La

réactivité du système de pilotage du point de vue systémique concerne l'évolution du système ou plus simplement le processus de pilotage directement impliqué.

Une mesure objective de la réactivité doit prendre en compte à la fois la performance du ré-ordonnement obtenu et les temps de réaction mis en jeu dans la totalité du processus de ré-ordonnement. C'est uniquement à partir de cette mesure que l'on désire analyser la performance d'une structure de décision ou plus généralement du processus de pilotage. En d'autres termes, on cherche à mesurer la performance en pilotage d'une structure de décision dans un contexte spécifique de structure d'information (moyens mis à disposition des décideurs pour communiquer) et avec un outil d'ordonnement spécifique (moyen de décision qui possède ces propres caractéristiques en terme de réactivité). L'analyse seule du comportement de la structure de décision n'est pas pertinente si on ne la place pas dans un contexte particulier de système de production.

Pour cela, il convient d'apporter une définition formelle de la réactivité du système de pilotage basée sur la performance des décisions prises et sur le temps qui est nécessaire à leur mise en œuvre dans un contexte de production spécifique.

II.8 Conclusion du chapitre

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté des modèles génériques pour représenter et simuler la structure du système de pilotage. Nous avons mis en avant les avantages et les lacunes de ces modèles notamment en terme de simulation et d'extraction de données relatives à la réalisation des processus de réaction. Parmi ces modèles, un modèle de pilotage, représenté à l'aide des réseaux de Petri compatible avec notre approche a été présenté.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons décrit des modèles des activités de pilotage et l'intérêt de certains d'entre eux pour l'intégration de nouvelles contraintes au cours de la phase de recherche de solution.

Enfin, dans la troisième partie, nous avons défini les spécifications relatives à la mesure de performance du système de pilotage, concernant l'intégration de la simulation de la structure et de l'activité du système de pilotage que nous prenons en compte dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Proposition d'un modèle de pilotage pour l'ordonnancement et la planification réactive.

III.1	Modèle de la structure de pilotage.....	52
III.1.1	Le réseau de pilotage.....	53
III.1.1.1	Autonomie des centres de décision.....	53
III.1.1.2	Modèle local de pilotage.....	54
III.1.1.3	Modèle global de pilotage.....	55
III.1.2	Temps de réaction de la structure de pilotage.....	58
III.2	Modèle des fonctions de pilotage.....	59
III.2.1	Propagation de contraintes.....	59
III.2.1.1	Précédence Interdite, Précédence Obligatoire.....	60
III.2.1.2	Tâche Non Première, tâche Non Dernière.....	61
III.2.1.3	Tâche Non Insérable, tâche Obligatoirement Première, tâche Obligatoirement Dernière.....	62
III.2.1.4	Règles d'analyse énergétique.....	63
III.2.2	Borne inférieure d'un problème d'ordonnancement.....	64
III.2.3	Planification.....	65
III.3	Réactivité du système de pilotage.....	67
III.3.1	Définition de la réactivité.....	67
III.3.2	Réactivité du système de pilotage.....	68
III.3.2.1	Ordonnancement réactif.....	68
III.3.2.2	Planification réactive.....	69
III.3.2.3	Réactivité des algorithmes de calcul.....	70
III.4	Conclusion du chapitre.....	70

Chapitre III

Proposition d'un modèle de pilotage pour l'ordonnancement et la planification réactive

Dans le chapitre précédent, les spécifications à prendre en compte pour résoudre les problèmes de cohérence entre les activités et la structure du système de pilotage ont été définies. Dans ce chapitre, nous proposons tout d'abord un modèle générique visant à mesurer la réactivité d'un système de pilotage à partir de toute structure et activité de décision. Nous proposons ensuite des activités de décision pour gérer des contraintes de ressources cumulatives tant sur les fonctions d'ordonnancement que sur les fonctions de planification.

Nous voyons, dans la première partie, comment représenter le processus de pilotage afin d'en extraire les données relatives à un type de réaction donné. Le modèle proposé constitue la base de notre contribution. Il est important de souligner que la souplesse du formalisme adopté permet de représenter d'autres modèles afin d'étudier l'impact de l'architecture sur la réactivité du pilotage. Nous proposons des réactions de type locales et globales et les précautions à prendre pour assurer la cohérence du pilotage. Nous montrons également comment intégrer les activités de décision et leur impact sur le cheminement des informations.

La deuxième partie expose comment nous assurons la cohérence des fonctions d'ordonnancement et de planification. Cette partie nous permet de proposer des activités de décision concernant la gestion de projet à contraintes de ressources cumulatives.

Enfin, dans la troisième partie de ce chapitre, nous définissons un indicateur de la réactivité du processus de pilotage fondé à la fois sur les temps de réaction et sur la qualité des solutions calculées et nous présentons la méthode que nous avons élaborée pour intégrer les propriétés de la structure et les activités de décision.

III.1 Modèle de la structure de pilotage

Tout d'abord, nous présentons le modèle structurel du système. Dans un second temps, nous présentons les paramètres liés à cette structure, tels que les temps de transfert des informations ou d'élaboration des décisions.

Les réseaux de Petri colorés temporisés ont été choisis pour formaliser le comportement des décideurs humains et les différents modes de réactions. Ce formalisme permet de représenter simplement des interactions entre les centres de décision [LEQ 03b][MEU 97]. Il permet en outre la simulation du transfert et des traitements d'informations. Bien que les réseaux de Petri soient simples d'utilisation, la colorisation des jetons ajoute de la richesse aux réseaux pour représenter des fonctions logiques OU, ET ou des fonctions conditionnelles qui permettent selon la couleur des jetons de représenter des types de réactions différentes.

III.1.1 Le réseau de pilotage

Pour présenter le modèle associé à un centre de décision, nous distinguons ce qui est propre à ce système de pilotage local de ce qui dépend de son environnement. Cette distinction se caractérise par la définition de l'autonomie d'un centre de décision [HUG 94]. L'autonomie d'un centre de décision est notamment caractérisée par trois fonctions (Choix du mode, décision sous contraintes et décision sur contraintes).

Cette approche nous amène à présenter en premier lieu un modèle générique pour le pilotage local.

Puis, nous proposons un modèle de pilotage global concernant la coordination et la coopération de plusieurs centres de décision de même niveau hiérarchique. Ces deux modèles sont basés sur le modèle générique d'un centre de décision [TAH 01] (cf. II.1.2). Nous présentons ces modèles et le principe de leur fonctionnement. Le détail des modèles et leur mise en oeuvre sont apportés dans le chapitre IV.

Enfin, la mise en relation des centres de décision de niveaux hiérarchiques différents est exposée en présentant la gestion des conflits par arbitrage.

III.1.1.1 *Autonomie des centres de décision*

Un centre de décision peut prendre certaines décisions dont il est seul responsable (décisions sous contraintes) et des décisions qu'il partage avec d'autres centres de décision (décisions sur contraintes). Les décisions sous contraintes concernent l'ensemble des variables de décision pour lesquelles le choix d'une valeur n'a pas d'impact sur les contraintes exogènes du sous-problème, alors que les décisions sur contraintes concernent l'ensemble des variables de décision pour lesquelles le choix d'une valeur a un impact sur les contraintes exogènes du problème. Le centre de décision choisit d'agir sur les contraintes endogènes ou exogènes grâce à une fonction « choix du mode » permettant de définir, à l'aide de mécanismes de propagation de contraintes, pour une décision, quel mode de décision adopter.

Lorsqu'un centre de décision prend des décisions *sous contraintes*, il n'est pas nécessaire de transférer les informations de modification du plan de travail aux autres centres de décision. En effet, aucune contrainte exogène n'est apportée ou modifiée, la boucle de pilotage se confine au centre de décision et aux ressources qu'il contrôle. Ce type de réaction est une boucle locale de pilotage.

En revanche, un centre de décision qui agit *sur les contraintes* modifie une ou plusieurs contraintes préalablement posées pour lui-même et pour d'autres centres de décision. Il y a une remise en cause de contraintes exogènes. Ce type de réaction est une boucle globale de pilotage. Considérons l'exemple de deux tâches liées par une contrainte sous la responsabilité de deux centres de décision. Les modifications des domaines admissibles pour chacune des tâches peuvent entraîner des modifications pour l'autre tâche, dans ce cas on parle de coordination entre ces centres de décision. De même, dans le cas de responsabilité conjointe où plusieurs ressources appartenant à des centres de décision différents sont concernées par l'exécution de la même tâche (décision sur contraintes), on parle alors de coopération entre ces centres de décision.

La co-existence de boucles de pilotage locales et globales impose la modélisation d'une structure de décision de classe II, d'après la typologie présentée au chapitre I.3.2.

III.1.1.2 Modèle local de pilotage

Chaque centre de décision d est responsable d'un ensemble de tâches T_d , il est soumis à des contraintes notées X_{ij} définies par : $x_j - x_i \in D_{ij}$ ensemble des valeurs permises pour la contrainte X_{ij} . Une partie de ces contraintes est directement liée aux tâches dont il est responsable, dans ce cas i et $j \in T_d$. Ce sont des contraintes endogènes; l'autre partie de ces contraintes venant d'autres centres de décision, dans ce cas $i \in T_d, j \in T_e$ avec $e \in U - \{d\}$, où U est l'ensemble des centres de décision du système de pilotage; ce sont des contraintes exogènes du problème.

Ces centres de décision sont situés en amont ou en aval, dans le cas de centres de décision de niveaux hiérarchiques différents, ou de manière transversale dans la cas où les centres de décision sont de même niveau hiérarchique. Contrairement au pilotage global que nous verrons dans la section suivante, le pilotage local ne nécessite pas de coordination de ressources ayant pour pilotes des centres de décision différents (figure III-1). Le centre de décision considéré n'agit donc que sur les contraintes endogènes le concernant.

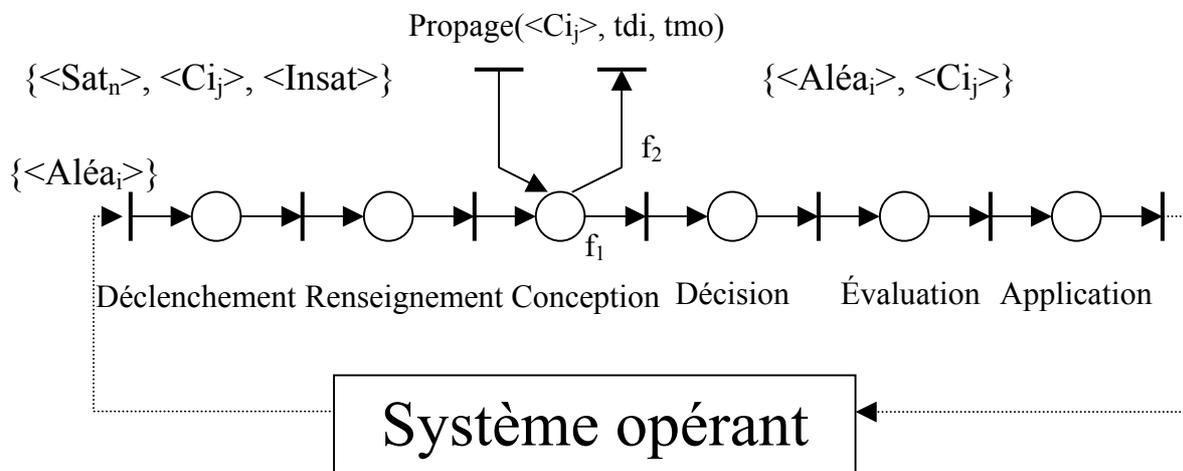


Figure III-1 Modèle local de pilotage

Dans la figure III-1, lorsqu'un aléa indéterminé survient sur une tâche i au niveau du système opérant, un jeton $\langle \text{Aléa}_i \rangle$ est créé au niveau de la transition précédent le déclenchement du centre de décision qui pilote le système opérant perturbé. Ce jeton représente une ou plusieurs nouvelles contraintes du problème.

La fonction f_2 est paramétrée pour tirer un jeton $\langle \text{Aléa}_i \rangle$ ou un jeton $\langle \text{C}_i \rangle$ correspondant à une variable C d'une tâche i .

La fonction f_1 est paramétrée pour tirer un jeton $\langle \text{Sat}_n \rangle$ ou un jeton $\langle \text{Insat} \rangle$ correspondant au résultat de la propagation. Ainsi, à l'étape de conception, un jeton $\langle \text{Aléa}_i \rangle$ déclenche la fonction $\text{Propage}(\langle \text{C}_{ij} \rangle, t_{di}, t_{mo})$.

La fonction de propagation Propage est une fonction appelée à chaque fois que la transition puits qui lui est liée est tirée. Les jetons correspondants sont alors sortis du réseau. Ils sont transformés par la fonction Propage en nouvelles contraintes du problème d'ordonnancement au niveau local. La propagation est réalisée localement avec ces nouvelles contraintes. Par la suite, d'autres jetons sont générés au niveau de la transition source qui lui est reliée en fonction du résultat renvoyé par la fonction de Propage (voir chapitre IV) aux autres centres de décision.

Si le problème de satisfaction de contraintes est satisfait, alors le centre de décision réagit localement. En d'autres termes, si les intervalles des fenêtres d'exécution des tâches qui sont par ailleurs liées avec des tâches pilotées par d'autres centres de décision sont inchangés, alors le centre de décision réagit de manière locale. En effet, il existe alors au moins une modification qui prend en compte les nouvelles contraintes dues à l'aléa mais qui laisse inchangées les contraintes exogènes du sous problème. Dans ce cas, le centre de décision agit uniquement sur les contraintes endogènes du problème.

Si le problème de satisfaction de contraintes n'est pas satisfait alors la fonction *Propage* crée de nouveaux jetons correspondant aux contraintes non satisfaites lors de la propagation. Les fonctions associées aux arcs permettent alors des réactions différentes en fonction des nouveaux jetons générés par la propagation de contraintes, ces jetons peuvent être de plusieurs types :

<C _i >	propagation d'une nouvelle variable C _i
<Sat ₀ >	propagation accomplie avec succès au niveau 0
<Sat ₁ >	propagation accomplie avec succès au niveau 1
<Sat ₂ >	propagation accomplie avec succès au niveau 2
<Insat>	propagation accomplie avec insatisfaction relevée

Lorsqu'un jeton <Sat_n> est retourné à la place conception, la transition de décision peut alors tirer ce jeton <Sat_n> et finalement transmettre sa décision au niveau opérationnel. Le niveau 0 correspond à une satisfaction sans changement de l'ordre initiale dans la séquence locale des tâches. Le niveau 1 correspond à un changement de l'ordre initial dans la séquence locale des tâches. Le niveau 2 correspond à un changement d'ordre dans la séquence globale des tâches. Dans le cas où une insatisfaction est relevée, le jeton <Insat> est généré et transmis à la place conception. L'insatisfaction est alors répercutée vers le centre de décision hiérarchiquement supérieur, de sorte qu'un aléa sur le chemin critique provoque nécessairement le déclenchement du centre de décision qui pilote l'ensemble des tâches.

III.1.1.3 Modèle global de pilotage

Une boucle globale de pilotage implique plusieurs centres de décision dans le processus de pilotage. Une décision sur contraintes nécessite la coordination ou la coopération de plusieurs centres de décision. Les processus de coordination et de coopération impliquent des temps de transfert d'information et de décision qui dépendent des modifications choisies. Notre approche consiste donc à simuler de manière intégrée le processus de décision et le processus d'information pour assurer la cohérence du système de pilotage et du système opérant.

a) Coordination entre deux centres de décision.

La coordination avec d'autres centres de décision se manifeste par le besoin d'un centre de décision d'agir sur les contraintes qu'il partage avec d'autres centres de décision. Les réactions de type coordination sont appliquées lorsque des aléas portant sur les temps ou sur les séquences modifient des contraintes exogènes du problème. La coordination entre deux centres de décision CD_g et CD_h (figure III-2) est représentée par l'échange d'information à chaque étape du processus de décision et par la cohérence des décisions prises par chacun des centres de décision. On peut alors définir formellement la coordination entre deux centres de décision :

Définition : Deux centres de décisions CD_h et CD_g ayant respectivement la charge de deux ensembles de tâches T_h et T_g sont dits coordonnés si les intervalles de temps $[r_i, d_i]$ et $[r_j, d_j]$, des fenêtres d'exécution des tâches i et j appartenant respectivement aux ensembles T_h et T_g , sont liés par une contrainte C_{ij} .

La coordination entre centres de décision devient nécessaire lorsque la fenêtre d'exécution d'une tâche par rapport à l'ordonnancement initial ayant des contraintes avec des tâches d'autres centres de décision est changée. Dans ce cas, les centres de décision propagent la nouvelle contrainte et définissent de nouveaux intervalles de réalisation des tâches.

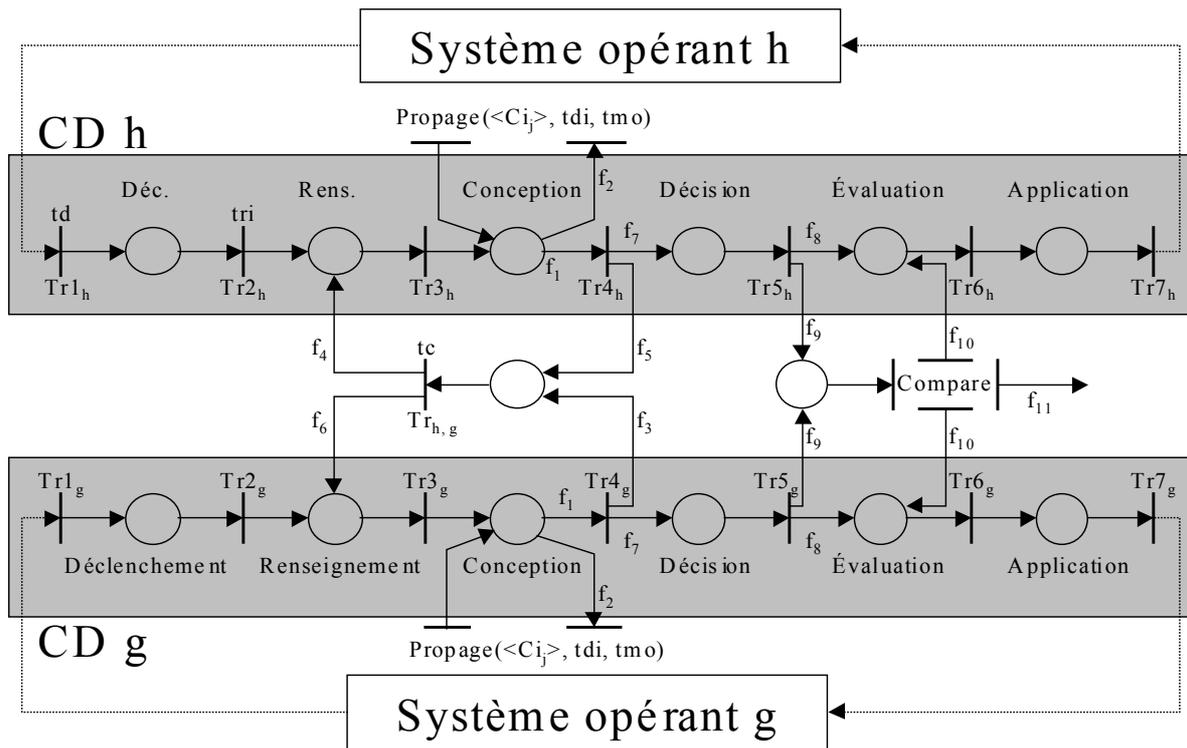


Figure III-2 Coordination entre deux centres de décision

Dans la figure III-2 ci-dessus, le système opérant g ayant subi un aléa, le centre de décision CD_g réalise la propagation de la nouvelle contrainte. Cette propagation donne lieu à la création d'une nouvelle contrainte correspondant à une contrainte exogène du problème. Les fonctions f_3 et f_5 sont paramétrées pour tirer les jetons correspondant aux contraintes exogènes liant les centres CD_h et CD_g . Ces fonctions représentent l'envoi d'informations concernant les nouvelles contraintes. De la même manière, les fonctions f_4 et f_6 sont paramétrées pour tirer des jetons correspondant aux contraintes exogènes liant les centres CD_h et CD_g . Ces fonctions correspondent à la réception des informations concernant les nouvelles contraintes du problème. Ces fonctions sont détaillées dans le chapitre IV. En effet, la mise en œuvre de celles-ci dépend de la mise en relation des ressources, c'est-à-dire de l'affectation des tâches aux ressources et des contraintes entre les tâches du problème d'ordonnancement à résoudre. Si la propagation d'un des deux centres de décision provoque une insatisfaction de contraintes alors un jeton $\langle \text{Insat} \rangle$ est créé.

b) Coopération de deux centres de décision.

La coopération entre deux centres de décision est caractérisée par la réalisation d'une même tâche par des ressources pilotées par des centres de décision différents. Cela suppose que ces centres soient au préalable coordonnés dans la mesure où les ressources utilisées doivent être libres en même temps. La coopération avec d'autres centres de décision peut porter sur un échange de responsabilité d'une ou plusieurs tâches, soit parce qu'un centre de décision transfère la charge d'une tâche à un autre centre soit parce qu'il prend à sa charge de nouvelles tâches. La coopération entre centres de décision est liée à l'apparition d'aléas portant sur les ressources ou sur les modes d'exécution affectant les contraintes exogènes du problème. La coopération entre deux centres de décision est formalisée par la définition suivante :

Définition : Deux centres de décision CD_h et CD_g ayant respectivement la charge de deux ensembles de tâches T_h et T_g sont dits en coopération s'il existe au moins une tâche i appartenant à l'ensemble $T_h \cap T_g$.

La coopération entre deux centres de décision fait intervenir une fonction pour comparer les solutions apportées par chaque centre de décision, que l'on appelle *Compare*. Cette fonction garantit la faisabilité des solutions qui ont été choisies séparément. En effet, si les deux centres de décision considérés CD_h et CD_g proposent deux intervalles de temps I_h et I_g différents pour la réalisation d'une tâche i telle que $i \in T_h$ et $i \in T_g$, alors la fonction *Compare*, appelée lorsque la transition puits qui lui est liée est tirée, contrôle que l'intersection des deux intervalles I_h et I_g est supérieure à la durée de la tâche i . Si les domaines pour les tâches concernées sont compatibles alors la fonction *Compare* retourne un jeton $\langle \text{Sat}_2 \rangle$ activant les transitions sources liées aux fonctions f_{i0} . Dans le cas où les domaines sont incompatibles, c'est-à-dire si l'intersection de I_h et I_g est inférieure à la durée de i , la fonction retourne un jeton $\langle \text{Insat} \rangle$ qui activera la transition source liée à la fonction f_{i1} et déclenchera la décision d'un arbitre.

c) Gestion des conflits par arbitrage

Une analyse des conflits dans le contexte de pilotage distribué [LEQ 03a] met en évidence la nécessité de minimiser les temps de négociation entre centres de décision indépendants. Cependant, la modélisation d'une coopération ou d'une coordination par négociation est possible grâce à la souplesse offerte par les réseaux de Petri. Dans la pratique, les décideurs négocient entre eux en apportant plusieurs solutions, bien souvent ils connaissent les problèmes des décideurs adjacents et prennent au mieux en compte ces problèmes dans la solution qu'ils proposent. Si aucun accord n'est trouvé, alors la décision revient à un centre de décision qui arbitre la décision. Celui-ci est le supérieur hiérarchique de chacun des deux centres de décision. Ce centre de décision pilote l'ensemble des tâches de chaque centre de décision dont il est le supérieur hiérarchique. L'arbitrage est réalisé par ce centre de décision qui choisira la meilleure solution du point de vue du critère qui lui est associé lors de la conception du système de pilotage. Dans notre modèle, ce comportement est représenté par la création d'un jeton $\langle \text{Insat} \rangle$ dans la fonction *Compare* qui analyse la cohérence des solutions apportées par chaque centre de décision. Ce jeton est transmis par la fonction f_{i1} et déclenche le processus de décision du centre de décision en charge de l'arbitrage (figure III-3).

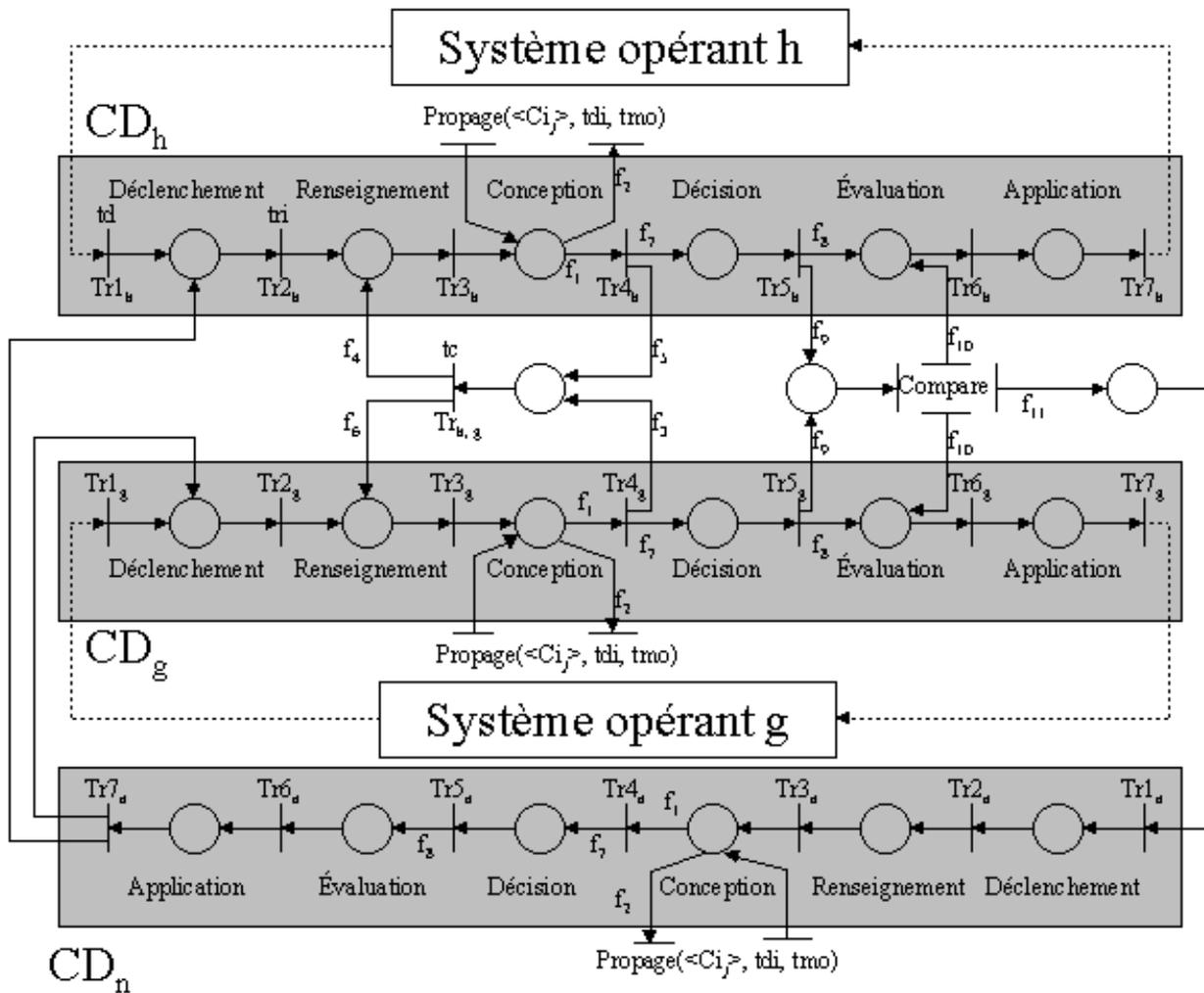


Figure III-3 Arbitrage de décision par un centre de décision CD_n

III.1.2 Temps de réaction de la structure de pilotage

Le temps de réaction de la structure de pilotage est une des propriétés fondamentales de l'approche retenue ici. Les temps de réaction sont constitués :

- d'une partie statique, ce sont les temps minimums de transmission d'information qui sont principalement déterminés par les moyens technologiques de communications (téléphone, courrier électronique...).
- d'une partie dynamique (temps de calcul de l'algorithme, temps de communication entre les centres de décision) qui dépend fortement de la nature du problème. On ne connaît pas a priori la valeur de ces temps de réaction.

Les temps de réaction dépendent fortement du type de réaction à mettre en œuvre et donc des aléas qui surviennent. En effet, les temps de transmission d'information dépendent du nombre de centre de décision à avertir selon la modification apportée. Quant aux temps de prise de décision, ils dépendent de la difficulté du problème à résoudre. Le type de réaction à mettre en œuvre dépend des contraintes qui changent uniquement à cause de l'aléa et

également des contraintes qui sont modifiées suite à la prise de décision d'un centre. Le processus de décision mis en jeu par l'apparition d'un aléa diffère selon les choix pris par chaque centre de décision. Les temps mis en jeu dans chaque processus de décision sont également différents.

Les temps de réaction sont associés à certaines transitions (cf. IV.2.1 pour le détail du paramétrage des temporisations). Les temps pris en compte dans le modèle concernent :

- le temps nécessaire à la détection,
- le temps de remontée des informations,
- le temps de prise de décision pour chaque centre,
- les temps de communication entre les centres,
- le temps de descente des informations,
- et enfin le temps de mise en œuvre des modifications.

III.2 Modèle des fonctions de pilotage

Les modèles génériques des fonctions de pilotage que nous présentons ici permettent la mesure de la réactivité d'un système de pilotage mais ne constituent pas la seule alternative de modélisation possible.

Dans un premier temps, nous présentons les outils de propagation de contraintes utilisés dans les algorithmes de planification et d'ordonnancement, pour affiner les fenêtres d'exécution des tâches et pour réaliser les problèmes de satisfaction de contraintes liés aux fonctions `Propage` du modèle de la structure du système de pilotage.

La deuxième section de cette partie présente une borne inférieure du problème d'ordonnancement utilisée dans notre algorithme de planification afin d'éliminer les plans sous-contraints.

Enfin, l'algorithme général de planification est décrit dans la dernière section de cette partie.

III.2.1 Propagation de contraintes

La propagation de contraintes permet d'éliminer un certain nombre de valeurs dans les intervalles de réalisation de chaque tâche à partir de déduction logique sur l'ordre et l'énergie minimale nécessaire pour la réalisation des tâches. Les principales règles de propagation de contraintes reposent sur des déductions logiques sur des ensembles de tâches bien choisis, ces règles sont définies dans [LOP 91][LOP 03][BAP 02]. Par la suite, on distingue les règles applicables :

- au cas cumulatif, où une tâche i sur une ressource k de capacité A_k consomme une certaine proportion a_{ik} de la ressource k pendant la durée p_i ,
- au cas disjonctif, où chaque tâche i consomme tout ou rien de la capacité de la ressource k .

Pour réaliser ces déductions logiques de manière efficace, on construit des groupes de tâches pour lesquelles l'exécution simultanée de deux ou plusieurs tâches n'est pas possible. On observe plus particulièrement deux types de groupe de tâches :

- les ensembles critiques où I , défini par $I \subseteq T_k$ avec T_k l'ensemble des tâches à réaliser sur la ressource k , est un ensemble critique si et seulement si :

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} a_{ik} &> A_k \\ \sum_{i \in I - \{j\}} a_{ik} &\leq A_k \quad \forall j \in I \end{aligned}$$

Pour un ensemble critique, il suffit de donner un ordre relatif entre deux tâches de l'ensemble critique pour résoudre les conflits

- les ensembles disjonctifs maximaux. Un ensemble disjonctif maximal est un plus grand sous ensemble de tâches D tel que tout couple de D est une paire de disjonctions. Formellement, D est un ensemble disjonctif maximal si et seulement si :

$$a_{ik} + a_{jk} > A_k \quad \forall i \in D, \forall j \in D, i \neq j$$

Pour ce type d'ensemble, toutes les tâches appartenant à l'ensemble doivent être ordonnées pour résoudre l'ensemble des conflits.

La première propagation de contraintes réalisée concerne l'ensemble des tâches d'un même projet. Les contraintes prises en compte à ce niveau sont les contraintes de gamme opératoire, les contraintes de disjonction entre tâches (dus à des consignes de sécurité) et les contraintes entre les différents produits d'un même projet (chevauchement entre les engins).

III.2.1.1 *Précédence Interdite, Précédence Obligatoire*

Dans le cas disjonctif, deux règles concernant l'ordre relatif de deux tâches peuvent être définies.

La première règle que nous voyons est la précédence interdite (PI) qui traduit l'impossibilité pour une tâche i d'être prédécesseur d'une tâche j . Il y a précédence interdite entre deux tâches i et $j \in I$, où I est un ensemble critique tel que $I \subseteq T_k$ l'ensemble des tâches à réaliser sur la ressource k :

$$\text{si } d_j - r_i < p_j + p_i \text{ alors } i \not\rightarrow j \quad (\text{PI})$$

La seconde règle concerne l'obligation d'ordre concernant deux tâches i et j appartenant au même ensemble critique I . Si les tâches i et j sont liées par une relation de type précédence interdite alors l'ordre inverse devient obligatoire (PO). On écrit formellement :

$$\text{si } i \not\rightarrow j \text{ et } (i, j) \in I \text{ alors } j \rightarrow i \quad (\text{PO})$$

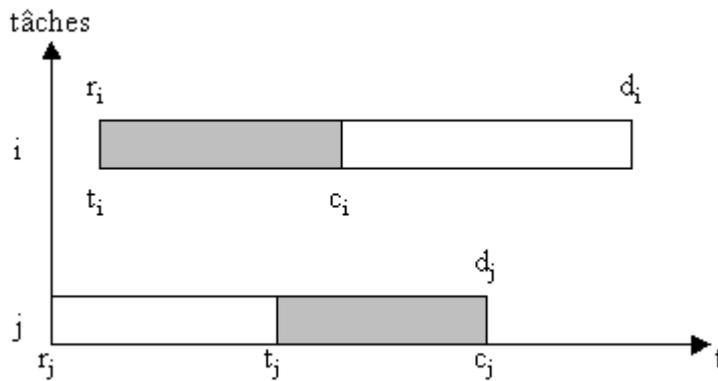


Figure III-4 Précédence interdite-Précédence obligatoire.

Sur la figure III-4, les tâches i et j ne peuvent pas être réalisées simultanément. La tâche i a une date de début au plus tôt r_i et dans ce cas la règle PI est vérifiée. Comme i et j ne peuvent être réalisées simultanément, la tâche i ne peut pas commencer avant la tâche j sinon il y a non satisfaction du problème.

III.2.1.2 Tâche Non Première, tâche Non Dernière

La règle de précédence interdite peut s'appliquer sur deux ensembles de tâches, l'un constitué d'une tâche unique i et l'autre un ensemble de tâches S, appartenant au même ensemble disjonctif maximal. Cette règle consiste à savoir si une tâche est non première (NP) ou non dernière (ND) par rapport à un ensemble de tâches S. Plus précisément chaque tâche de S est disjonctive avec la tâche i. Soit $lst(S)$ la date de début au plus tard sur l'ensemble des séquences admissibles sur S et $eft(S)$ la date de fin au plus tôt sur l'ensemble des séquences admissibles sur S :

$$\text{si } lst(S) - r_i < p_i \text{ alors } i \not\rightarrow S \quad (\text{NP})$$

$$\text{si } d_i - eft(S) < p_i \text{ S } \not\rightarrow i \quad (\text{ND})$$

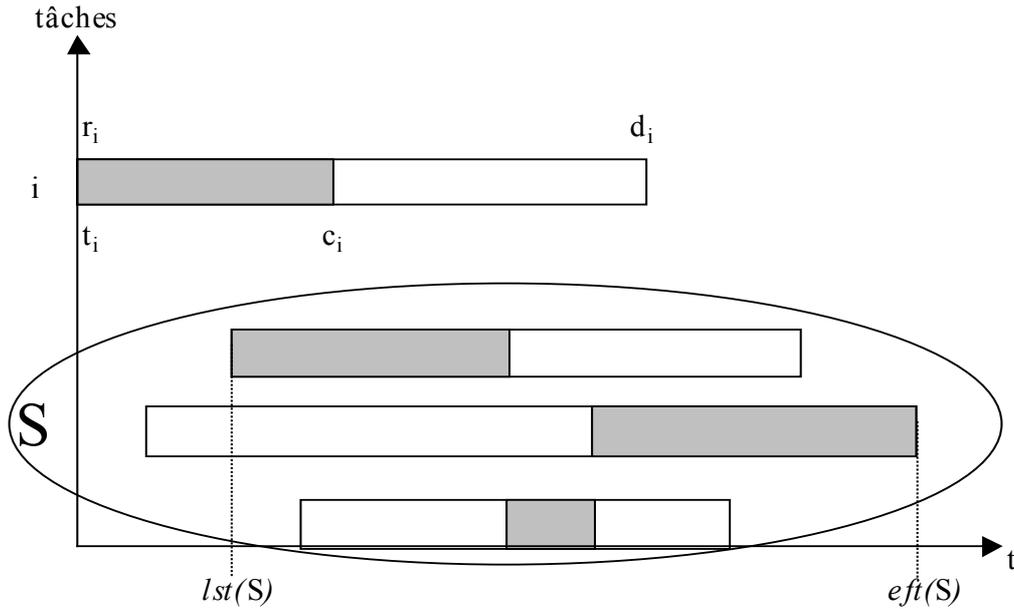


Figure III-5 Tâche i non première.

Sur la figure III-5, la date de fin au plus tard des tâches de l'ensemble S est telle que la règle NP est vérifiée. On remarque également dans ces conditions que i ne peut être réalisée entièrement avant la date de début au plus tard des tâches de l'ensemble S.

III.2.1.3 Tâche Non Insérable, tâche Obligatoirement Première, tâche Obligatoirement Dernière

La première règle que nous présentons ici concerne l'impossibilité d'insérer une tâche i dans un ensemble de tâche S. Dans le cas d'un ensemble disjonctif maximal I, la tâche $i \in I$ n'est pas insérable dans l'ensemble $S \subset I$, on note $i \not\ll S$:

$$\text{si } \max_{s \in S} d_s - \min_{s \in S} r_s < \sum_{s \in S} p_s + p_i \text{ alors } i \not\ll S \quad (\text{NI})$$

En combinant les déductions NI et NP ou ND, il est possible d'aboutir à des déductions sur l'ordre obligatoire entre une tâches i et un ensemble de tâches S. La première règle, appelée obligatoirement dernière (OD), concerne l'obligation de placer toutes les tâches de l'ensemble S avant la tâche i si la tâche i est non insérable dans S et non première :

$$\text{si } i \not\ll S \text{ et } i \not\rightarrow S \text{ alors } S \rightarrow i \quad (\text{OD})$$

De manière analogue, la seconde règle, appelée obligatoirement première (OP), concerne l'obligation de placer la tâche i avant toutes les tâches de l'ensemble S si la tâche i n'est pas insérable dans S et non dernière :

$$\text{si } i \not\ll S \text{ et } S \not\rightarrow i \text{ alors } i \rightarrow S \quad (\text{OP})$$

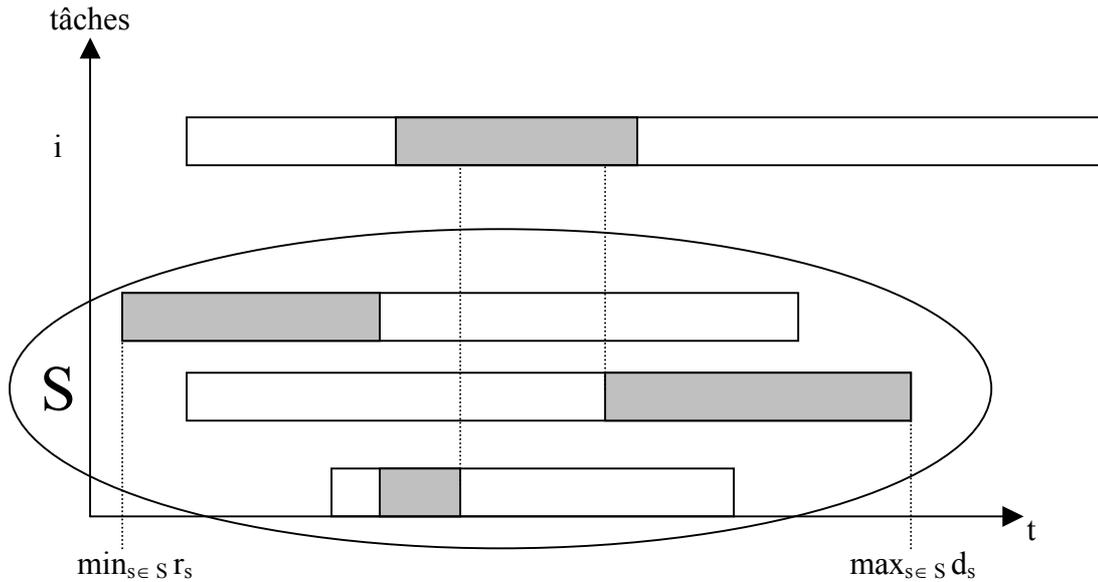


Figure III-6 Tâche I non insérable dans un ensemble S.

La figure III-6 illustre la règle NI. La tâche i et l'ensemble des tâches S sont tels que la règle NI est vérifiée. Comme la tâche i ne peut être réalisée en même temps que les tâches appartenant à l'ensemble S , elle ne peut pas être réalisée dans l'intervalle de temps $[\min_{s \in S} r_s, \max_{s \in S} d_s]$.

III.2.1.4 Règles d'analyse énergétique

Les règles de propagation dans le cas des problèmes à contraintes cumulatives reposent sur l'analyse de la capacité énergétique d'une machine pendant un intervalle de temps par rapport aux consommations obligatoires des tâches sur ce même intervalle de temps [LOP 91]. Chaque ressource k disposant d'une quantité A_k , l'analyse énergétique propose de déduire des intervalles de temps pour chaque tâche i nécessitant une quantité a_{ik} de la ressource k . Ce type de règle impose donc le découpage de l'horizon de planification en intervalle de temps. Le découpage en intervalle de temps s'avère très coûteux en temps de calcul et les complexités attendues sont en $O(n^3)$. Parmi les déductions basées sur les raisonnements énergétiques que nous utilisons, la première concerne la consistance du problème. On vérifie que pour tout intervalle de temps $\Delta = [r_\Delta, d_\Delta]$, l'énergie disponible W_k^Δ de la ressource k est supérieure à la somme des énergies w_i^Δ obligatoirement consommée sur ce même intervalle Δ par chaque tâche $i \in I_k$ l'ensemble des tâches à réaliser sur la ressource $k \in K$ que l'on note :

$$W_k^\Delta = \sum_i w_i^\Delta \quad \forall i \in I_k$$

$$\text{avec } w_i^\Delta = a_{ik} \cdot \max(0, \min(p_i, d_\Delta - r_\Delta, \underline{d}_i - r_\Delta, d_\Delta - \bar{r}_i))$$

où \underline{d}_i est la date de fin au plus tôt de la tâche i

et \bar{r}_i est la date de début au plus tard de la tâche i

De la même manière, on peut calculer l'énergie maximale \bar{w}_i^Δ que la tâche i peut consommer sur l'intervalle Δ :

$$\overline{w}_i^\Delta = a_{ik} \cdot \max (0, \min (p_i, d_\Delta - r_\Delta, \overline{d}_i - r_\Delta, d_\Delta - r_i))$$

où \overline{d}_i est la date de fin au plus tard de la tâche i
et r_i est la date de début au plus tôt de la tâche i

D'autres déductions basées sur la consommation de paires de tâches permettent de réduire les intervalles disponibles pour chaque tâche et sous certaines conditions de déduire des précédences interdites. Soit i et j deux tâches de l'ensemble I_k des tâches à réaliser sur la ressource k et $E_{(i,j)}^\Delta$ l'énergie maximale disponible sur la ressource k pour réaliser ces tâches sur l'intervalle de temps Δ , où :

$$E_{(i,j)}^\Delta = W_k^\Delta - \sum_{m \in I_k - \{i,j\}} W_m^\Delta$$

$$si \exists i, j, \Delta tq E_{(i,j)}^\Delta < \overline{w}_i^\Delta + \overline{w}_j^\Delta$$

alors il existe des couples de dates interdites pour i et j

Pour réaliser des déductions sur les ordres relatifs entre paires de tâches i et j sur la ressource j , nous utilisons des intervalles Δ tels que $r_\Delta = r_i$ et $d_\Delta = d_j$. La règle concernant l'ordre relatif de deux tâches sur un intervalle Δ en prenant en compte les énergies obligatoirement consommées sur ce même intervalle est formalisée de la manière suivante :

$$si A_k \cdot (d_\Delta - r_\Delta) < a_{ik} \cdot p_i + a_{jk} \cdot p_j + \sum_{m \in I_k - \{i,j\}} W_m^\Delta$$

alors $i \not\rightarrow j$

III.2.2 Borne inférieure d'un problème d'ordonnancement

Pour tout ensemble de tâches à réaliser nécessitant l'utilisation de la même ressource, nous proposons le calcul d'une borne inférieure reposant sur la relaxation des contraintes de précedence et sur la relaxation des contraintes de non préemption des tâches. L'objectif de cette borne inférieure est de garantir qu'il n'existe pas d'ordonnancement réalisable en deçà de la valeur calculée. Cette valeur sera calculée dans l'algorithme de planification afin de ne pas donner un objectif irréalisable en terme d'ordonnancement dans une fonction appelée LBound. La borne inférieure que nous utilisons a été proposé dans [MIN 98] sous une autre formulation.

Le nouveau problème à résoudre est celui de la maximisation du nombre de tâches réalisées dans l'intervalle $T = [0, Horizon]$ sous contraintes de délai. Ainsi voyons nous disparaître les contraintes de non préemption et les contraintes sur l'ordre des tâches deviennent des contraintes de délai pour les dates de début au plus tôt et de fin au plus tard des tâches. Les délais pour chaque tâche sont issus de la propagation de contrainte. La résolution de ce problème permet d'obtenir une borne inférieure pour la réalisation d'un ensemble de tâches sur une ressource de type cumulatif. Le problème à résoudre pour chaque

ressource k de capacité instantanée Cap_k ayant à réaliser un ou des ensembles de tâches I_k d'un ou de plusieurs produits m et nécessitant une certaine proportion a_{ik} de la ressource k sur l'intervalle de temps T peut s'exprimer sous la forme du programme mathématique suivant :

$$\begin{aligned}
 & \text{Max} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{t=0}^{t=Horizon} x_{it} \cdot a_{ik} \\
 & \text{s.c.} \quad \sum_{t=R_m+r'_i}^{t=D_m-d'_i} x_{it} \cdot a_{ik} = W_i \quad \forall i \in I_k \quad \forall m \in M \quad (1) \\
 & \quad \quad \sum_{i=1}^n x_{it} \cdot a_{ik} \leq Cap_k \quad \forall t \in T \quad \forall k \in K \quad (2) \\
 & \quad \quad \sum_{t=0}^{t=R_m+r'_i} x_{it} = 0 \quad \forall i \in I_k \quad \forall m \in M \quad (3) \\
 & \quad \quad \sum_{t=D_m-d'_i}^{Horizon} x_{it} = 0 \quad \forall i \in I_k \quad \forall m \in M \quad (4) \\
 & \quad \quad x_{it} \in \{0,1\}
 \end{aligned}$$

Dans le programme mathématique ci-dessus, les variables binaires x_{it} sont telles que :

$$\begin{aligned}
 x_{it} &= 1 \text{ si la tâche } i \text{ est réalisée dans l'intervalle } t, \\
 x_{it} &= 0 \text{ sinon.}
 \end{aligned}$$

La contrainte (1) représente la nécessité de réaliser la charge W_i associée à la tâche i . La contrainte (2) indique la capacité de la ressource k . La somme de l'ensemble des tâches pour chaque intervalle de temps doit être inférieure ou égale à la capacité de la ressource. Enfin, les contraintes (3) et (4) interdisent la réalisation d'une tâche i dans des intervalles de temps t en dehors de $[r_i, d_i]$.

Les intervalles de temps pour chaque tâche i ($R_m + r'_i, D_m - d'_i$) sont calculés à l'aide des règles de propagation de contraintes présentées dans les sections précédentes. La date de fin au plus tard d_i d'une tâche i correspond à la différence entre la date de sortie D_m du produit m et d'_i la longueur du plus grand chemin entre la fin de la tâche i et la fin du produit m , soit :

$$d_i = D_m - d'_i$$

De même, la date de début au plus tôt r_i d'une tâche i est calculée à l'aide de propagations de contrainte entre les tâches du même projet :

$$r_i = R_m + r'_i$$

III.2.3 Planification

La planification que nous proposons s'appuie sur le calcul d'un ensemble de produits à réaliser sur l'horizon de planification, compte tenu de la capacité totale des ressources, c'est-à-dire de la capacité des ressources sur tout l'horizon de planification. Le principe est donc de calculer un nombre de produits à réaliser sur l'horizon de planification et de vérifier

itérativement l'adéquation entre la charge planifiée et la capacité quotidienne de chaque ressource à l'aide de la borne inférieure présentée ci-dessus.

En premier lieu, l'algorithme réalise donc un calcul de planification classique type MRP appelé `Planifie(Horizon, graphe)` à l'étape (1) de l'Algorithme III-1, où la variable `Horizon` représente l'horizon de planification et la variable `graphes` symbolise l'ensemble des données relatives à l'affectation des tâches et à leurs contraintes.

Les fenêtres d'exécution des tâches sont actualisées à l'étape (2) par la propagation de contraintes réalisée par la fonction `Propagation(NbProduits, graphe)`. La variable `tâches` représente l'ensemble des tâches et leur domaine admissible.

Les résultats obtenus sont utilisés dans la vérification de l'existence d'une borne inférieure, présentée dans la section III.2.2. On vérifie qu'il est possible qu'une solution ordonnancée existe grâce à la fonction `LBound(Horizon, Tâchesk)` à l'étape (3), qui utilise la borne inférieure présentée dans la partie III.2.2, pour chaque ressource k ayant à réaliser l'ensemble de tâches $Tâches_k$. Cette fonction renvoie un booléen, noté `continu`, égal à `true` si le problème est satisfait, `false` s'il ne l'est pas. Si la borne est vérifiée alors il n'y a pas de conflits dus à l'utilisation des ressources, dans le cas contraire, on abaisse la capacité totale de la ressource qui a provoqué l'insatisfaction de la borne (étape (4) de l'algorithme).

```

Tant que ( continu = false )
continu = true
    NbProduits = Planifie( Horizon, graphe )      (1)
    Tâches = Propagation( NbProduits, graphe )    (2)
    Pour chaque ressource k
        Rk = LBound ( Horizon, Tâchesk )      (3)
        Si Rk = false alors
            Capa(Rk) = Capa(Rk) - 1 %      (4)
            continu = false
        Fin Si
    Fin pour chaque ressource
    Retourne NbProduits
Fin tant que

```

Algorithme III-1 Algorithme de planification

Cet algorithme de planification repose donc sur un calcul de type MRP qui sert à calculer le nombre de produits acceptables compte tenu des capacités globales des ressources. Il est ensuite affiné en vérifiant l'existence d'une borne inférieure compte tenu des contraintes cumulatives quotidiennes des ressources. Si la borne n'existe pas alors il n'existe pas d'ordonnancement permettant la réalisation de la planification. Il convient alors de réduire la capacité globale de la ressource surchargée sur l'horizon de planification. En pratique celle-ci est réduite de 1%. Cette valeur n'a pas été choisie arbitrairement, elle est bornée par une valeur maximale qui correspond à la consommation minimale non nulle de la ressource considérée sur l'ensemble des projets. Ceci revient à dire qu'en abaissant la capacité globale de la ressource de cette consommation minimale, on ne peut pas trouver un écart supérieur à un produit entre le nombre de produits obtenus à la planification précédente et le nombre de

produits calculés à la prochaine itération. Compte tenu de cette borne, cette valeur peut être choisie de façon maximale pour améliorer la convergence de l'algorithme de planification.

Cette méthode permet d'obtenir une planification au plus juste des capacités quotidiennes des ressources.

III.3 Réactivité du système de pilotage

Dans cette partie, nous détaillons l'intégration des temps de réaction issus de la simulation du processus de décision dans les fonctions de pilotage présentée dans les parties précédentes.

En premier lieu, nous proposons une mesure de la réactivité du système de pilotage basée à la fois sur les temps de réaction dépendant des activités et de la structure de pilotage et sur la qualité des solutions apportées.

Nous détaillons dans les sections suivantes le comportement des fonctions d'ordonnancement d'une part et de planification d'autre part dans un contexte de décision spécifique.

III.3.1 Définition de la réactivité

Une approche basée sur les temps de réaction de la structure de pilotage a été formulée par Régnier et Vallespir [REG 95]. Notre approche, elle aussi basée sur les temps de réaction, consiste à définir la réactivité comme le rapport entre un ré-ordonnancement où le calcul est réalisé avec l'intégration des temps de réaction des centres de décision et un ré-ordonnancement sans l'intégration des temps de réaction. Ainsi pouvons-nous obtenir une mesure de la réactivité qui comporte simultanément la performance mesurée, donnée par la solution de l'ordonnancement, et le temps de réaction nécessaire à l'atteinte de cette performance.

On définit alors la réactivité Γ par :

$$\Gamma = 1 - \frac{|f_{i,tr} - f_{i,0}|}{f_{i,0}}$$

où $f_{i,tr}$ est la mesure de la solution obtenue pour le problème i prenant en compte les temps de réaction tr avec un algorithme A ,

et $f_{i,0}$ est la mesure de la solution obtenue pour le problème i sans les temps de réaction avec le même algorithme A .

Par définition, une réactivité égale à 100 % est obtenue lorsque les temps de réaction n'ont aucun impact sur le processus de ré-ordonnancement. Cette mesure permet d'analyser la réactivité d'un système de pilotage en fonction de ces paramètres (temps de réaction, critères associés aux centres de décision).

III.3.2 Réactivité du système de pilotage

Pour caractériser la réactivité globale du processus de pilotage, les temps de réaction induits par le processus lui-même sont intégrés au calcul. Plus précisément, les temps de transfert d'information amont et aval sont pris en compte dans la calcul d'ordonnancement. Par ailleurs, on peut prendre en compte le temps de détection des aléas et le temps nécessaire à la mise en œuvre des corrections sur les séquences de tâches calculées par les centres de décision.

III.3.2.1 Ordonnancement réactif

L'ordonnancement réactif consiste à proposer des nouvelles dates de début et de fin pour un ensemble de tâches perturbées par un aléa [LEQ 03a]. Les chapitres précédents ont montré que la nécessité de garantir la mise en application des nouvelles décisions impose la prise en compte des temps de réaction nécessaires à la coordination de l'ensemble des acteurs concernés par l'aléa. Par ailleurs, le contexte distribué des décisions induit une variété de type de réactions aussi grande que la variété des aléas pouvant survenir. Notre approche consiste à calculer une solution en tenant compte du type de réaction du système de pilotage. Pour garantir l'applicabilité de la solution, on contrôle la cohérence de la solution retenue et du processus de pilotage. Parmi l'ensemble des algorithmes d'ordonnancement existants, il convient de distinguer ceux qui fonctionnent par une construction progressive de l'ordonnancement. En effet, seul ce type d'algorithme permet l'introduction de nouvelles contraintes au cours de la procédure de recherche. Les algorithmes ne fonctionnant pas sur le principe de construction progressive ne peuvent prendre en compte de nouvelles contraintes qu'au début de l'algorithme d'ordonnancement, limitant de ce fait leur utilisation dans notre méthode à l'étude des temps de réaction statiques.

Une tâche ne peut être modifiée que si sa date de début est supérieure à la date de détection de l'aléa t_a plus le temps de réaction total du processus de pilotage noté δ . En effet, aucune tâche ne peut être ré-ordonnée au niveau opérationnel avant que les ressources n'en soient averties. A ce moment, il convient de distinguer deux cas selon les temps de réaction et les instances du problème d'ordonnancement :

1. si la date initiale de début t_i de la tâche i est inférieure à la date $t_a + \delta$, alors la tâche sera commencée avant même que l'on y apporte des modifications. Dans ce cas, la nouvelle date de début t_i' est égale à t_i puisque les temps de réaction n'ont pas permis le changement de date,
2. si la date initiale de début t_i de la tâche i est supérieure à la date $t_a + \delta$, alors une modification pourra avoir lieu, mais elle ne pourra être lancée au niveau opérationnel qu'à l'issue du processus de pilotage, c'est-à-dire après la date $t_a + \delta$.

La nouvelle date de début t_i' d'une tâche i est donc supérieure au minimum entre sa date de début initiale t_i et la date de détection t_a de l'aléa augmentée du temps de réaction δ du centre de décision chargé de la tâche i . Cette condition est assurée par l'ajout d'une règle portant sur la date de début au plus tôt d'une tâche modifiée. Cette règle porte sur la date de début de chaque tâche i :

$$t_i' \geq \min (t_i , \delta + t_a)$$

Cette simple règle assure la cohérence entre le processus de pilotage tel qu'il est réalisé sur le terrain et les résultats que ce processus a générés.

Prenons un exemple illustré par la figure III-6, de deux ressources m_1 et m_2 sous la responsabilité de deux centres de décision CD_1 et CD_2 ayant à réaliser respectivement l'ensemble des travaux $T_1 = \{j_{3,1}; j_{1,1}\}$ et $T_2 = \{j_{2,1}; j_{2,2}; j_{3,2}\}$ avec $j_{2,1} \rightarrow j_{2,2}$ et $j_{3,1} \rightarrow j_{3,2}$. L'ordonnancement initial est donné par la Figure III-7a.

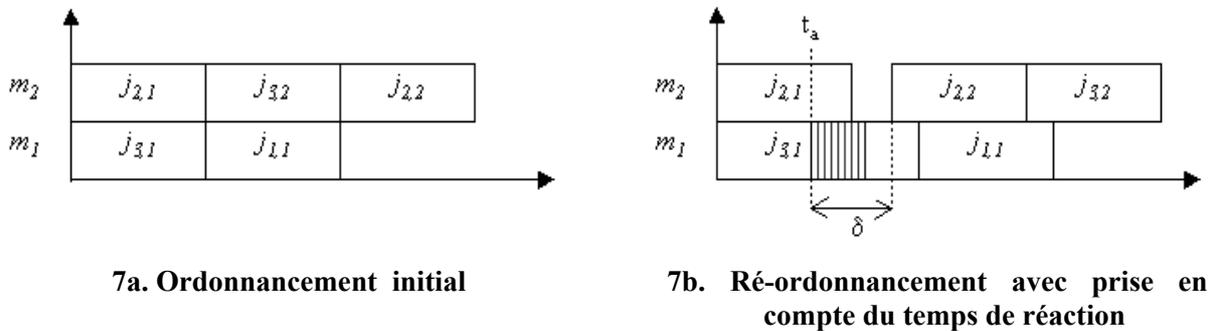


Figure III-7 Exemple d'ordonnancement réactif

Sur la figure III-7b, on suppose l'apparition d'un aléa sur la ressource m_1 à la date t_a . Le ré-ordonnancement suggère une permutation entre les tâches $j_{2,2}$ et $j_{3,2}$. Or le temps de réaction total δ nécessaire à la mise en œuvre de la modification implique une date de début au plus tôt des tâches modifiées supérieure ou égale à la date de détection de l'aléa t_a plus le temps de réaction.

L'ordonnancement ainsi réalisé fournit de nouveaux intervalles de temps à prendre en compte dans la planification pour mesurer la performance globale de l'établissement en terme de réactivité.

III.3.2.2 Planification réactive

La planification réactive consiste à recalculer, lorsqu'un aléa survient, la charge maximale réalisable sur l'horizon de planification restant. Les décisions à mettre en œuvre à l'issue de ce calcul concernent le changement des objectifs ou l'ajustement des capacités de production affectées à un projet particulier pour conserver les objectifs initiaux liés à ce projet.

L'ajustement des objectifs peut concerner la modification des dates de sorties et d'entrée prévues des produits ou ajuster le nombre de produits à réaliser sur la durée restante. La planification réactive que nous proposons de réaliser prend en compte certaines contraintes de délai comme les dates d'arrivée R_m et de sortie D_m des produits (durée d'immobilisation). Cette planification prend en compte les contraintes de délai comme les dates de début au plus tôt r_i et de fin au plus tard d_i des tâches i d'un produit m calculées selon les règles de propagation utilisées dans les problèmes à contraintes cumulatives. De cette manière, la planification réactive peut prendre en compte les contraintes issues de l'ordonnancement réactif en ajustant les contraintes sur le début au plus tôt des tâches à replanifier et la capacité quotidienne des ressources.

III.3.2.3 Réactivité des algorithmes de calcul

De la même façon, on peut définir la réactivité d'un algorithme d'ordonnancement. Si l'on cherche à caractériser uniquement les performances de l'algorithme de calcul, les seuls temps de réaction à inclure dans le calcul concernent les temps de calcul consommés par l'algorithme de recherche. Dans ce cas, il convient de comparer les résultats obtenus avec l'optimum ou la meilleure borne inférieure connue pour le problème considéré. La réactivité de l'algorithme de calcul est donc obtenue en intégrant des contraintes de délai (temps de calcul de l'algorithme utilisé) sur les tâches que l'on souhaite modifier. Cette intégration est réalisée en ajoutant les contraintes de délai de réaction (cf. Chapitre III.3.2) à chaque itération de l'algorithme de calcul au cours de la procédure de séparation et d'évaluation.

III.4 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre nous avons exposé en première partie le modèle représentant la structure de pilotage et permettant la simulation des flux d'information et de décision. Il permet de simuler le processus de décision distribué et d'en extraire les données relatives aux temps de réaction. Ce modèle permet également de lier la structure du système de pilotage avec ses activités grâce à l'intégration des fonctions `Propage` et `Compare` dans le modèle.

Dans la deuxième partie, nous avons proposé un modèle pour la planification de produits complexes et un modèle pour vérifier l'existence d'un ordonnancement pour affiner les résultats obtenus au niveau de la planification et obtenir des résultats au plus près des capacités des ressources. Le modèle proposé assure la cohérence entre les fonctions planification et ordonnancement en calculant la borne inférieure de l'ordonnancement.

Enfin dans la troisième partie de ce chapitre, nous avons montré qu'il est possible d'intégrer les temps de réaction dans les activités d'ordonnancement et de planification réactives à l'aide de nouvelles règles de propagation.

Chapitre IV

Mise en œuvre

IV.1	Instanciation du modèle du système de pilotage	73
IV.1.1	Paramétrage de la structure du réseau	74
IV.1.2	Paramétrage du réseau	75
IV.1.2.1	Domaine des transitions	75
IV.1.2.2	Fonctions associées aux arcs	76
IV.1.2.3	Temporisations des transitions	78
IV.1.3	La fonction Propage	79
IV.2	Implémentation des algorithmes de planification et d'ordonnancement	83
IV.2.1	Planification	83
IV.2.1.1	Périodes multiples	84
IV.2.1.2	Paramétrage de la stratégie de recherche	84
IV.2.2	Ordonnancement	85
IV.2.2.1	Création des aléas	85
IV.2.2.2	Ré-ordonnancement	85
IV.3	Maquette informatique	86
IV.3.1	Liaison entre les applications	86
IV.3.2	Algorithme général pour l'analyse de la réactivité	86
IV.4	Conclusion du chapitre	87

Chapitre IV

Mise en œuvre

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté le modèle permettant la représentation du système de pilotage, les outils de propagation utilisés pour l'ordonnancement, la planification et l'intégration des temps de réaction dans l'activité de décision.

Dans ce chapitre, nous présentons les méthodes et moyens mis en œuvre pour paramétrer l'outil de simulation du système de pilotage à partir des modèles proposés dans le chapitre III. Ces explications sont basées sur un exemple simple, présenté à la suite de l'introduction, qui sert d'illustration à chacune des parties de ce chapitre.

La première partie de ce chapitre concerne la modélisation, sous la forme d'un réseau de Petri, du système de pilotage. Nous décrivons le paramétrage des temporisations, des ensembles franchissables pour chaque transition et des fonctions associées aux arcs. L'algorithme permettant l'utilisation de la propagation de contraintes pour la simulation du réseau de pilotage est ensuite présenté.

La deuxième partie décrit les informations relatives au paramétrage des algorithmes de propagation, de calcul de planification et de ré-ordonnancement. Nous nous attachons particulièrement au paramétrage de la stratégie de recherche lors de la procédure de séparation et d'évaluation progressive, pour la planification, et à la création des aléas au sein du modèle d'ordonnancement.

Enfin, la troisième partie est consacrée à l'intégration des deux applications, la simulation du processus de décision et les différents calculs nécessaires au ré-ordonnancement des tâches et à la re-planification des engins.

Présentation de l'exemple :

Dans cet exemple nous considérons deux centres de décision CD_1 et CD_2 , pilotant respectivement la ressource R_1 de capacité $Cap_1 = 3$ et la ressource R_2 de capacité $Cap_2 = 3$, sous l'arbitrage d'un troisième centre de décision CD_3 (figure IV-1).

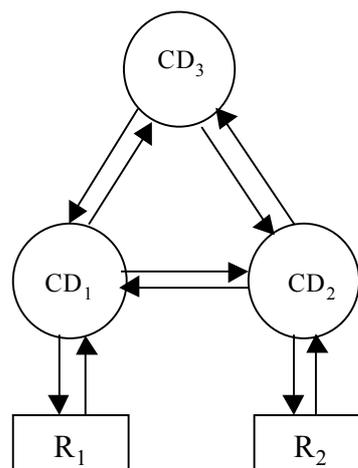


Figure IV-1 Schéma de la structure de décision de l'exemple illustratif

Les tâches f_i , avec $i \in \{1..6\}$, de l'exemple utilisé pour l'implémentation sont représentées par le graphe potentiel tâche $G(V,P,D)$ de la figure IV-2. La tâche ω est une

tâche fictive de durée nulle représentant la fin de l'ordonnancement. Le poids des arcs représente la durée des tâches et les variables a_{ik} représentent la consommation de la tâche i en ressource k . On rappelle qu'un arc à simple flèche représente une contrainte de précédence entre deux tâches et qu'un arc à double flèche représente une contrainte de disjonction entre deux tâches.

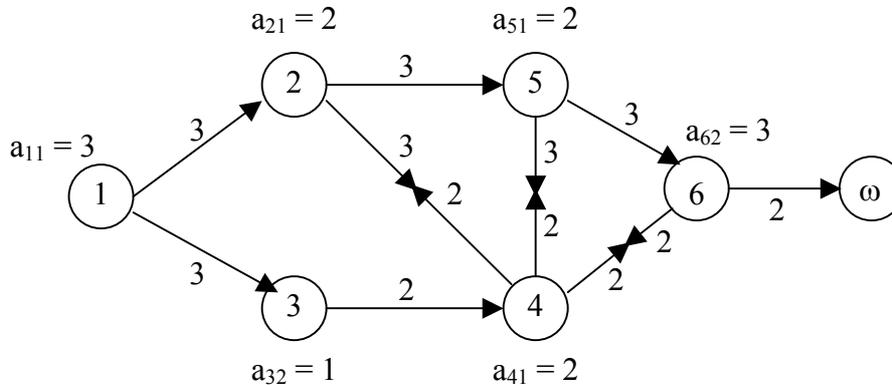


Figure IV-2 Graphe $G(V,P,D)$ associé à l'exemple d'implémentation

Ces tâches sont placées selon les ordonnancements initiaux décrits par les diagrammes de Gantt de la figure IV-3. L'ordonnancement choisi n'est volontairement pas optimal pour simplifier les scénarii servant à l'illustration des mécanismes de propagation présentés dans la partie IV.1.3.

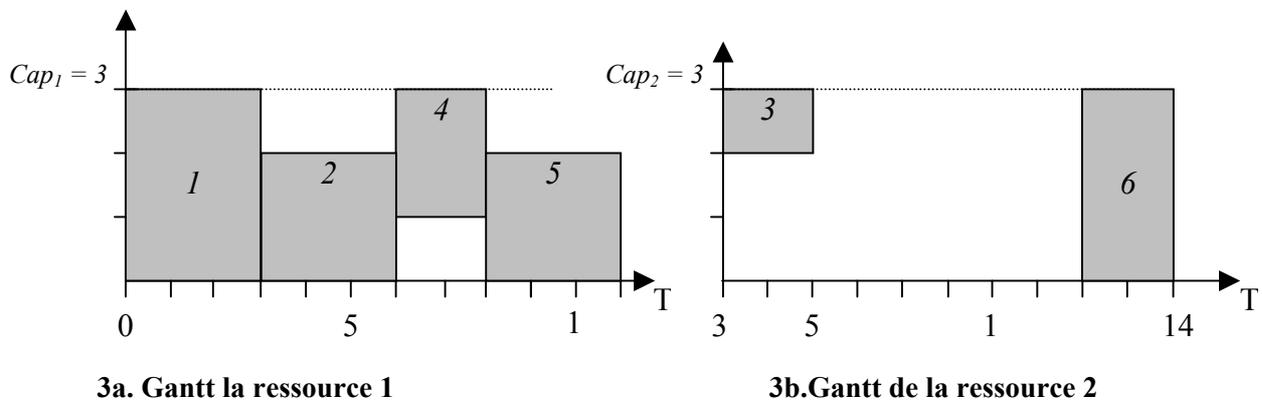


Figure IV-3 Ordonnements initiaux pour les ressources 1 et 2

IV.1 Instanciation du modèle du système de pilotage

Dans cette partie, nous présentons le paramétrage des réseaux de Petri pour modéliser la structure de pilotage.

Nous montrons tout d'abord comment sont modélisées les relations entre les centres de décision à partir des données du graphe représentant le problème d'ordonnancement à résoudre.

Le paramétrage du réseau, c'est-à-dire comment sont définis les domaines de chaque transition, les fonctions associées aux arcs et la temporisation des transitions sont ensuite décrits.

Enfin, l'algorithme de la fonction `Propage` appelé lorsque les transitions de propagation sont tirées et qui permet de lier la simulation du processus de pilotage avec l'activité de décision est explicité.

IV.1.1 Paramétrage de la structure du réseau

En premier lieu, nous associons à chaque centre de décision le modèle local de pilotage défini au chapitre III.1.1.2. Ensuite, les liens informationnels entre les centres de décision correspondent aux contraintes entre les ensembles de tâches de chaque centre de décision. Pour modéliser la structure du système de pilotage à l'aide des réseaux de Petri, on construit une place et une transition pour la coordination entre les centres de décision liés par des contraintes de production. Le graphe $G(V, P, D)$ nous renseigne sur les contraintes de gamme (contraintes de précédences) et sur les contraintes disjonctives, mais nous savons qu'il existe également des contraintes cumulatives liées aux consommations spécifiques des tâches par rapport à la capacité des ressources. Ces dernières sont particulièrement difficiles à prendre en compte au niveau de la structure du système de décision. En effet, la construction des ensembles critiques est NP-difficile dans notre contexte et leur représentation en terme de lien au niveau de la structure de décision aboutirait à un graphe fortement connexe, c'est-à-dire à un réseau de décision où tous les centres de décision sont reliés (cas des systèmes de décision hétérarchiques au sens fort). Pour résoudre ce problème, le réseau de décision est construit à partir d'une solution déjà calculée de sorte que les contraintes disjonctives et cumulatives du problème initial sont devenues des contraintes de précédences puisqu'un ordre entre les tâches contraintes a été choisi.

Par ailleurs, il faut intégrer les contraintes de coopération sur certaines tâches. Si pour une même tâche i , $i \in I_1$ ensemble des tâches sur la ressource 1 et $i \in I_2$ ensemble des tâches sur la ressource 2 alors il doit y avoir une synchronisation pour le déclenchement du processus de décision des centres de décision respectivement responsables des ressources 1 et 2. Plus clairement, si un aléa touche la tâche i alors les centres de décision CD_1 et CD_2 sont déclenchés par un jeton issu de la même transition.

Cas de l'exemple :

L'objectif relatif aux centres de décision 1 et 2 est la maximisation de l'occupation des ressources. Le centre CD_3 qui pilote les centres de décision CD_1 et CD_2 a pour objectif la minimisation de la date de fin maximale des travaux (makespan). Les variables de décision pour chaque centre sont les dates de début et de fin des tâches dont ils sont responsables.

Le centre CD_1 est responsable des tâches $\{1, 2, 4, 5\}$, le centre CD_2 est responsable des tâches $\{3, 6\}$. Par exemple, un aléa sur la tâche 1 d'une durée de deux unités de temps sera représenté par un jeton $\langle C1_2 \rangle$ puisque la date de fin de la tâche 1 augmente de deux unités de temps.

IV.1.2 Paramétrage du réseau

IV.1.2.1 *Domaine des transitions*

Afin de représenter les informations circulant entre les centres de décision, nous associons à chaque variable du problème des jetons particuliers. Pour chaque variable de décision x_i du problème d'ordonnancement, on associe un jeton $\langle X_{ij} \rangle$ dont l'indice j est l'écart entre la nouvelle et l'ancienne valeur de la variable x_i . La date de fin c_i d'une tâche i est donc représentée par un jeton $\langle C_i \rangle$. De la même manière, on associe un jeton $\langle T_{ij} \rangle$ à la date de début t_i de chaque tâche i . Chaque centre de décision ayant un ensemble de variables à prendre en compte, on définit les domaines des transitions de chaque centre en fonction des variables qu'il doit prendre en compte.

Pour chaque transition, on associe un ensemble de jetons franchissables correspondant aux variables de décision qu'un centre de décision doit prendre en compte lors du processus de pilotage. Ce paramétrage permet simplement d'exprimer des conditions en fonction de la couleur des jetons. En effet, si un jeton n'est pas franchissable pour une transition, alors elle ne sera jamais franchie pour un jeton de la même couleur. Cette propriété couplée avec des fonctions pertinentes au niveau des arcs est utile pour la modélisation du processus de décision. En effet, le processus de décision dépend fortement de l'aléa à traiter. De plus comme nous l'avons mentionné au chapitre III, pour un même aléa plusieurs réactions sont possibles en fonction des choix réalisés par chacun des centres de décision concernés par un processus de pilotage. Pour résoudre ce problème de diversité, le modèle proposée est un modèle générique dont l'implémentation dépend essentiellement de la nature du problème de production à résoudre. Notre modèle est aussi très proche de ce que décrit formellement un processus de décision, plus précisément les informations et les décisions représentées par des jetons colorés indicés dans notre modèle sont directement associées aux variables du problème de ré-ordonnancement à résoudre. Par conséquent, le domaine des transitions dépend du problème de production et des choix stratégiques d'affectation des tâches aux ressources et des ressources aux centres de décision en ayant la charge.

Cas de l'exemple :

Pour illustrer la méthodologie mise en œuvre pour l'implémentation du réseau, nous prenons l'exemple de la paire de tâche 1 et 3 liées par une contrainte de précédence sur le graphe G de la figure IV-2. Puisque la tâche 1 précède la tâche 3, un lien d'information entre le centre de décision CD_1 et le centre de décision CD_2 doit exister. De plus le domaine admissible pour la transition T_{CD_1,CD_2} contient l'ensemble des jetons correspondant aux variables de décision des centres de décision liées aux tâches 1 et 3.

D'après la définition de l'exemple et l'ensemble des contraintes du graphe G , le domaine admissible pour la transition T_{CD_1,CD_2} (figure IV-4) est :

$$\{\langle C1 \rangle, \langle C2 \rangle, \langle C3 \rangle, \langle C4 \rangle, \langle C5 \rangle, \langle C6 \rangle, \langle Sat_0 \rangle, \langle Sat_1 \rangle, \langle Sat_2 \rangle, \langle Insat \rangle, \langle Att_{CD_1} \rangle, \langle Att_{CD_2} \rangle\}.$$

Les jetons $\langle C_i \rangle$ correspondent aux variables c_i des dates de fin des tâches i . Les jetons $\langle Sat_0 \rangle$, $\langle Sat_1 \rangle$, $\langle Sat_2 \rangle$ sont associés aux niveaux de satisfaction donnés par la fonction $Propage$ présentée dans la partie IV.1.3 de ce chapitre.

De même, le domaine admissible pour les transitions Tr_4 de chaque centre est :

$\{ \langle C1 \rangle, \langle C2 \rangle, \langle C3 \rangle, \langle C4 \rangle, \langle C5 \rangle, \langle C6 \rangle, \langle Sat_0 \rangle, \langle Sat_1 \rangle, \langle Sat_2 \rangle, \langle Insat \rangle, \langle Att_{CD1} \rangle, \langle Att_{CD2} \rangle \}$.

IV.1.2.2 Fonctions associées aux arcs

Pour chaque arc une fonction est implémentée et permet de modifier la coloration ou l'indice des jetons rendant ainsi certaines transitions franchissables et d'autres infranchissables. De plus, le paramétrage de ces fonctions permet de définir un flux d'information selon la couleur du jeton. Cela permet selon la couleur du jeton, c'est-à-dire selon la variable de décision correspondante, de faire circuler l'information vers l'ensemble des centres de décision concernés par la modification de cette variable de décision.

Cas de l'exemple :

D'après le graphe G de la figure IV-2, on doit réaliser des liens d'information entre les centres de décision CD_1 et CD_2 pour assurer la coordination entre les paires de tâches (1,3) (3,4) (3,5) (5,6) (4,6) et la coopération pour la tâche 5. Il existe donc des places et des transitions liant les centres de décision CD_1 et CD_2 . Les fonctions associées aux arcs permettent de définir les flux d'informations possibles entre ces deux centres. Nous présentons, sur la figure IV-4, le modèle de deux centres de décision réalisant chacun une partie de l'ordonnancement donné par le graphe G.

Les fonctions f_5 et f_6 de la figure IV-4 sont paramétrées manuellement pour laisser passer les jetons associés aux paires de tâches (1,3) (5,6) et (4,6) d'indice j , représentant l'écart entre l'ancienne et la nouvelle valeur de chaque variable, de la manière suivante :

$$\begin{array}{ll}
 - f_5(\langle C1_j \rangle) = \langle C1_j \rangle + \langle Att2 \rangle & - f_6(\langle C1_j \rangle) = \langle T3_j \rangle \\
 - f_5(\langle C5_j \rangle) = \langle C5_j \rangle + \langle Att2 \rangle & - f_6(\langle C5_j \rangle) = \langle T6_j \rangle \\
 - f_5(\langle C4_j \rangle) = \langle C4_j \rangle + \langle Att2 \rangle & - f_6(\langle C4_j \rangle) = \langle T6_j \rangle \\
 - f_5(\langle Sat_n \rangle) = \langle Sat_n \rangle & - f_6(\langle Sat_n \rangle + \langle Att1 \rangle) = \langle Sat_n \rangle \\
 - f_5(\langle Insat \rangle) = \langle Insat \rangle & - f_6(\langle Insat \rangle + \langle Att1 \rangle) = \langle Insat \rangle
 \end{array}$$

Les fonctions f_3 et f_4 sont paramétrées pour laisser passer les jetons associés à la paire de tâches (3,4) de la manière suivante :

$$\begin{array}{ll}
 - f_3(\langle C3_j \rangle) = \langle C3_j \rangle + \langle Att1 \rangle & - f_4(\langle C3_j \rangle) = \langle T4_j \rangle \\
 - f_3(\langle Sat_n \rangle) = \langle Sat_n \rangle & - f_4(\langle Sat_n \rangle + \langle Att2 \rangle) = \langle Sat_n \rangle \\
 - f_3(\langle Insat \rangle) = \langle Insat \rangle & - f_4(\langle Insat \rangle + \langle Att2 \rangle) = \langle Insat \rangle
 \end{array}$$

Les jetons $\langle Att1 \rangle$ et $\langle Att2 \rangle$ signifient que le centre de décision à l'origine de la création de la nouvelle contrainte attend une réponse concernant la satisfaction du problème de la part des centres qu'il a contacté.

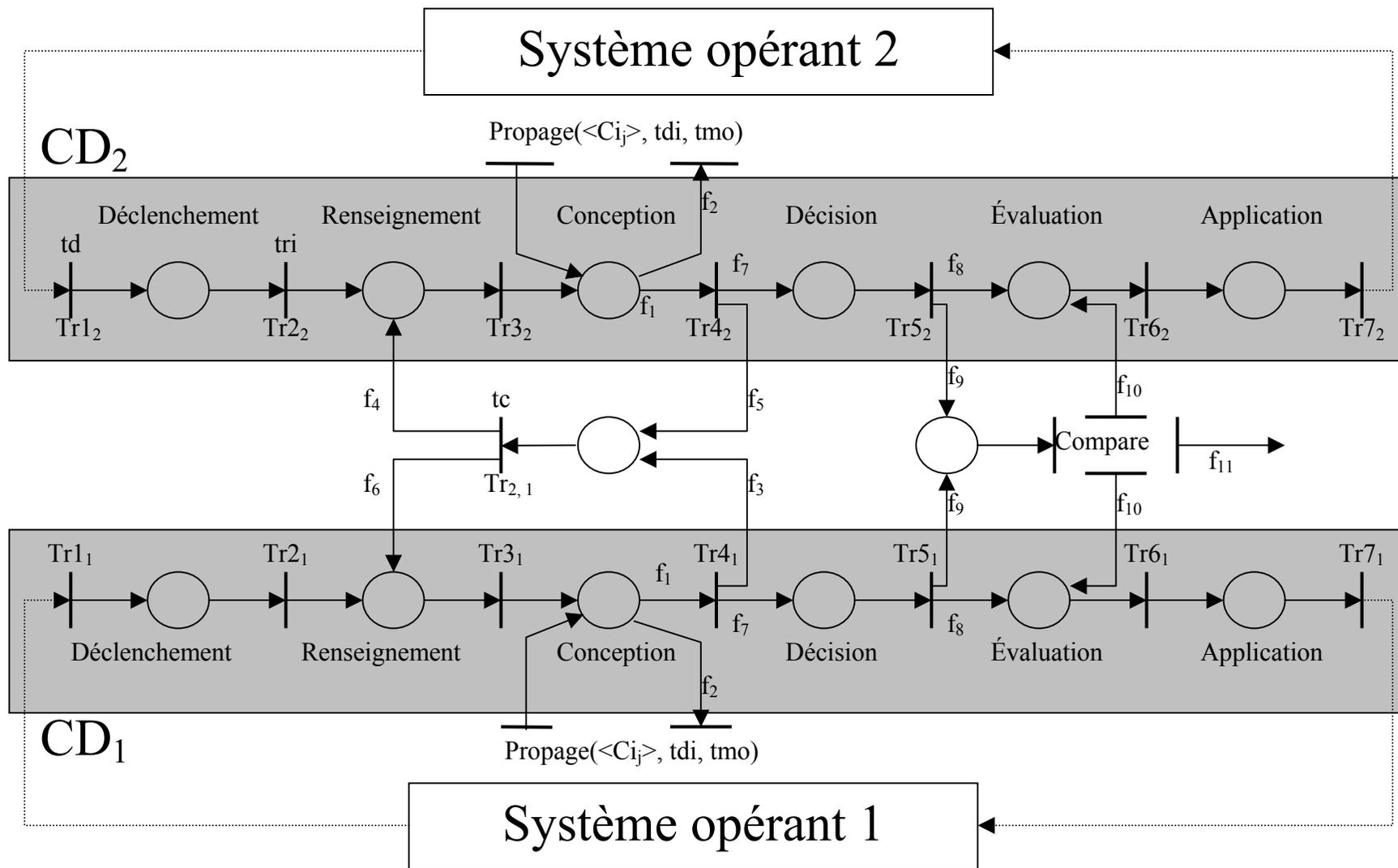


Figure IV-4 Modèle de pilotage de deux centres de décision

La fonction f_7 est identique pour chaque centre, elle est paramétrée pour laisser passer des jetons de type $\langle \text{Sat}_n \rangle$ ou $\langle \text{Insat} \rangle$ de la manière suivante :

- $f_7(\langle \text{Sat}_n \rangle) = \langle \text{Sat}_n \rangle$
- $f_7(\langle \text{Insat} \rangle) = \langle \text{Insat} \rangle$

La fonction f_8 est également commune à chaque centre de décision; elle permet de tirer les jetons correspondants à la satisfaction de la propagation en local :

- $f_8(\langle \text{Sat}_0 \rangle) = \langle \text{Sat}_0 \rangle$ dans ce cas l'ordre local précédent n'est pas remis en cause
- $f_8(\langle \text{Sat}_1 \rangle) = \langle \text{Sat}_1 \rangle$ dans ce cas l'ordre local précédent est remis en cause

A l'inverse, la fonction f_9 tire les jetons représentant la nécessité de remettre en cause les contraintes exogènes du problème, par exemple lorsque le problème est satisfait par la permutation de deux tâches sous la responsabilité de deux centres de décision différents. De plus cette fonction transmet les jetons correspondant à l'insatisfaction globale du problème nécessitant l'intervention d'un centre de décision hiérarchiquement responsable. La fonction f_9 est donc paramétrée de la manière suivante :

- $f_9(\langle \text{Sat}_2 \rangle) = \langle \text{Sat}_2 \rangle$ dans ce cas l'ordre global est remis en cause
- $f_9(\langle \text{Insat} \rangle) = \langle \text{Insat} \rangle$

Par la suite la fonction `Compare` analyse la compatibilité des décisions prises par chaque centre. si celles-ci sont compatibles la fonction f_{10} permet de transmettre un jeton $\langle \text{Sat}_2 \rangle$, dans le cas contraire la fonction f_{11} transmet un jeton $\langle \text{Insat} \rangle$ au centre hiérarchiquement responsable. Les fonctions f_{10} et f_{11} sont paramétrées de la manière suivante :

- $f_{10}(\langle \text{Sat}_2 \rangle) = \langle \text{Sat}_2 \rangle$
- $f_{11}(\langle \text{Insat} \rangle) = \langle \text{Insat} \rangle$

Dans le cas où un jeton $\langle \text{Insat} \rangle$ est généré, le centre de décision hiérarchiquement responsable est déclenché. Ce centre peut alors modifier les objectifs qu'il avait préalablement posés pour respecter les nouvelles contraintes du problème.

IV.1.2.3 Temporisations des transitions

Pour intégrer les temps de réaction à notre modèle, nous associons une temporisation à certaine transition du réseau de Petri. On ne peut pas affecter de temporisations aux transitions ayant plus d'un arc sortant. En effet, ces transitions représentent des processus différents selon la couleur des jetons et ces processus ne consomment pas nécessairement la même quantité de temps. Pour contourner le problème, il est possible de valuer dynamiquement les temporisations pour ces transitions mais cette méthode est très complexe à mettre en œuvre. C'est pourquoi nous avons choisi d'associer les temporisations uniquement aux transitions ayant un seul arc sortant. De cette manière, la transition correspond à un processus unique et une temporisation unique.

Dans le chapitre III, nous avons présenté les temps à inclure dans le temps de réaction total du processus de réaction. Parmi ces temps, ceux qui précèdent l'ensemble des décisions

peuvent être associés aux transitions correspondantes. Sur la figure IV-4, le temps de détection de l'aléa td au niveau du système opérant 1 sous la responsabilité du centre de décision CD_1 est donc associé à la transition $Tr1_1$, et le temps de remontée des informations, noté tri , du système opérant 1 au centre de décision CD_1 est associé à la transition $Tr2_1$.

Pour le temps de réaction intervenant pendant le processus de réaction, c'est-à-dire le temps de communication tc entre deux centres CD_1 et CD_2 et le temps de l'élaboration des décisions $tdec$, il est nécessaire d'incrémenter le temps total de réaction en fonction du processus de décision. Le temps de communication entre les centres de décision est associé à la transition $Tr_{n,g}$ liant les centres de décision CD_1 et CD_2 . Et le temps d'élaboration des décisions correspond au temps nécessaire à la construction des décisions pour chaque centre.

En revanche pour les temps de réaction qui interviennent après la décision, c'est-à-dire le temps de descente des informations noté tdi et le temps de mise en œuvre tmo des nouvelles décisions, il n'est pas cohérent de les associer aux transitions correspondantes, situées après la décision dans le réseau, sous peine de ne pas les prendre en compte dans l'activité de décision. Ces temps de réaction sont donc calculés dans l'algorithme de propagation pour chaque centre et propagés selon la règle énoncée au chapitre III.3.2.1 permettant d'intégrer les temps de réaction dans l'algorithme de propagation.

Cas de l'exemple :

Dans notre exemple, nous considérons des temps de communication entre les centres CD_1 et CD_2 noté $tc_{12} = 1$. Les temps de déclenchement et de remontée des informations sont égaux pour les centres CD_1 et CD_2 . Leur valeur est fixée arbitrairement à 0.5 unité de temps. De la même façon, on définit des temps de descente des informations et de mise en œuvre égaux pour les centres CD_1 et CD_2 . La valeur choisie est de 0.5 unité de temps pour chacun de ces temps de réaction. Lorsque les centres de décision CD_1 et CD_2 déclenchent le centre de décision CD_3 qui est leur supérieur hiérarchique, les temps de réaction à prendre en compte concernent le temps de remontée de l'information tri associé à ce centre, le temps d'élaboration des décisions $tdec$ et le temps de descente des informations tdi . Ceux ci sont pris en compte dans la construction des nouveaux objectifs résultant de l'activité de décision du centre CD_3 .

IV.1.3 La fonction Propage

Dans cette partie, nous décrivons en détail le fonctionnement de l'algorithme de propagation, présenté par l'algorithme IV-1 ci-dessous, utilisé par la fonction `Propage` dans le modèle de pilotage. En entrée, la fonction `Propage` reçoit un jeton $\langle Xi_j \rangle$ où Xi est la couleur associée à la variable x_i de la tâche i indicées par le temps j , qui correspond à l'augmentation de la valeur de l'ancienne variable x_i de la tâche i . On connaît la contrainte qui est remise en question en transformant le jeton à l'aide d'une fonction appelée `transformejeton` (étape (1) de l'algorithme).

```

transformejeton(Xij) (1)
Si (Propagation0(x'i = xi+j)) (2)
    Renvoi <Sat0>
Sinon Si (Propagation1(x'i = xi+j)) (3)
    Renvoi <Sat1>
Sinon Si non(Propagation2(x'i = xi+j)) (4)
    Renvoi <Insat>
Sinon
    Pour chaque tâche k
        envoyé = faux
        Si x'k ≠ xk
            <Xkj> = transcontrainte(x'k, j = x'k-xk) (5)
            Renvoi( <Xkj> )
            envoyé = vrai
        Fin Si
    Fin Pour
    Si non(envoyé) (6)
        Renvoi <Sat2>
    Fin Si
Fin Sinon

```

Algorithme IV-1 La fonction Propage

A partir de la nouvelle contrainte, des mécanismes de propagation classiques présentés dans le chapitre III.2.1 sont appliqués. Nous réalisons trois niveaux de propagation qui diffèrent les uns des autres par les intervalles d'exécution disponibles pour chaque tâche et représentent les différentes sorties possibles de la fonction Propage en fonction des résultats de la propagation de contrainte :

- La propagation de niveau 0 est réalisée à l'étape (2) avec les intervalles de temps en conservant l'ordre local et global des tâches. Cette propagation a pour but de vérifier rapidement si un aléa peut être absorbé localement par les marges libres des tâches. Si le problème de satisfaction de contrainte généré par la fonction propagation0 est satisfait alors un jeton <Sat₀> est généré.
- La propagation de niveau 1 consiste à chercher à l'étape (3) si le problème peut être satisfait en remettant en cause l'ordre local des tâches. Si le problème de ce niveau est satisfait alors une permutation de deux tâches sous la responsabilité du même centre de décision peut être effectuée. Un jeton <Sat₁> est créé et la réaction se confine à la boucle locale.
- La propagation de niveau 2 analyse la possibilité de réaliser des modifications sur l'ordre global des tâches. Les centres de décision doivent donc prendre en compte les intervalles de temps des tâches des autres centres de décision pour lesquels il existe une contrainte de disjonction avec au moins une tâche du centre de décision réalisant la propagation de contrainte. Si le problème n'est pas satisfait un jeton <Insat> est créé. Dans le cas contraire, il est nécessaire de créer des jetons

correspondant aux variables des tâches des autres centres de décision qui ont été modifiées (étape 5) à l'aide de la fonction `transcontrainte` afin d'envoyer la demande de modification de ces variables. Si aucune variable n'a été modifiée alors on renvoi un jeton `<Sat2>`.

Cas de l'exemple :

Afin d'illustrer la propagation de contraintes et le cheminement des informations dans le réseau, trois scénarii sont développés :

1. Un aléa sur la tâche 3 d'une durée d'une unité de temps détecté à la date $t_a = 4$.
2. Un aléa sur la tâche 3 de trois unités de temps détecté au début de la tâche 3 à la date $t_a = 4$.
3. Un aléa sur la tâche 3 d'une durée de cinq unités de temps détecté à la fin de la tâche 3 à la date $t_a = 5$.

Scenario 1 :

Un aléa sur la tâche 3 d'une durée d'une unité de temps détecté à la date $t_a = 4$.

L'aléa considéré dans ce scénario est représenté par un jeton `<P31>`. Ce jeton qui déclenche le centre de décision CD_2 indique que la durée de la tâche 3 est augmentée d'une unité de temps. La fonction `Propage` de CD_2 est activée par ce jeton dont l'âge est 1 à cette étape de la simulation. La première étape de l'algorithme de propagation consiste à transformer le jeton de la manière suivante :

$$p'_3 = p_3 + 1 \text{ d'où } p'_3 = 3$$

Ensuite, la propagation proprement dite peut commencer avec cette nouvelle valeur. Celle ci est réalisée en premier lieu avec les dates de début et de fin des tâches choisies par l'ordonnancement initial (propagation niveau 0). Du point de vue de CD_2 , les dates de début au plus tôt et de fin au plus tard de la tâche 3 sont :

$$r_3 = 3 \text{ et } d_3 = 6$$

Ce problème de satisfaction de contraintes est donc résolu car la tâche 3 peut être réalisée dans l'intervalle $[3, 6]$. L'aléa est absorbé par la marge disponible pour la tâche 3. La dernière étape de la fonction `Propage` consiste à renvoyer un jeton `<Sat0>` correspondant à la satisfaction de la propagation de contraintes niveau 0. C'est-à-dire que l'ordre initial des tâches est conservé sans que cela ne nuise aux objectifs initialement posés. Ce jeton est ensuite répercuté par les fonctions f_7 et f_8 et active l'application en local de la décision (dans ce cas la décision consiste à ne pas changer l'ordre initial des tâches). L'ordonnancement n'est modifié que par l'allongement de la tâche 3 d'une unité de temps, l'ordre initial local et global des tâches est conservé.

Scenario 2 :

Un aléa sur la tâche 3 de trois unités de temps détecté à la date $t_a = 4$.

Dans ce scénario, la couleur du jeton qui représente l'aléa est identique au scénario 1 mais son indice est égal à trois. Le jeton `<P33>` va donc activer la fonction `Propage` de CD_2 . La nouvelle durée de la tâche 3 est $p'_3 = 5$. Les propagation de contrainte niveau 0 et 1 ne sont pas satisfaites car l'intervalle $[3, 6]$ pour la réalisation de la tâche 3 est insuffisant. La fonction `propage` génère donc un jeton `<C32>` qui indique que la date de fin au plus tard de la tâche 3

est augmentée de deux unités de temps. Ce jeton est transmis via la fonction f_3 (définie dans la partie IV.1.2.2) qui le transforme en $\langle T4_2 \rangle$, représentant la date de disponibilité de la tâche 4, et qui génère un jeton $\langle Att1 \rangle$ représentant l'attente d'une réponse de la part de CD_1 . Ensuite ce jeton $\langle T4_2 \rangle$ dont l'âge est maintenant 2 active la fonction $Propage$ de CD_1 . La propagation de contraintes de niveau 0 n'est pas satisfaite car le nouvel intervalle $[8, 9]$ pour la tâche 4 n'est pas suffisant. La propagation de contraintes niveau 2 est donc activée avec deux tâches 4 et 5 appartenant au même ensemble critique dont les intervalles sont respectivement $[8, 12]$ et $[7, 12]$ (figure IV-5). En effet, la date de début au plus tôt de la tâche 5 prend en compte les temps de réaction et la règle énoncée dans la section III.3.2.1 est appliqué de la manière suivante :

$$t'_5 \geq \min(t_5, t_a + \delta) \text{ avec } t_5 = 9, t_a = 4 \text{ et } \delta = 3 \text{ (âge du jeton + tdi + tmo)}$$

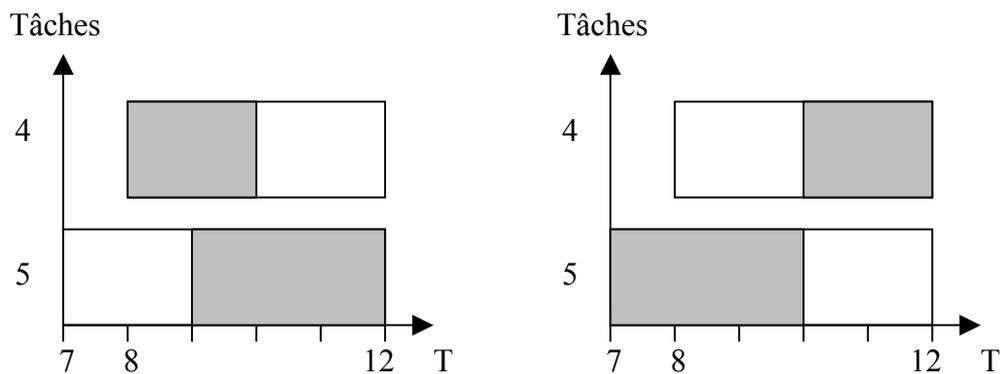


Figure IV-5 Les deux alternatives de la propagation de contraintes

La figure IV-5 schématise les deux alternatives, dans la première 4 précède 5, dans la seconde 5 précède 4. La règle relative à la Précédence Obligatoire est déclenchée et donne lieu à un nouvel ordre local entre les tâches 4 et 5. Le problème de satisfaction de contraintes de niveau 1 est satisfait et la fonction $Propage$ de CD_1 renvoie un jeton $\langle Sat_1 \rangle$. Celui-ci est alors transmis à la fois par la fonction f_7 pour application de la permutation et par la fonction f_3 pour répondre à CD_2 qui par la suite active l'application du nouvel ordre au niveau du système opérationnel piloté par CD_2 . L'ordonnancement final est modifié (voir figure IV-6). Les tâches 4 et 5 ont été permutées pour continuer à réaliser les objectifs initiaux.

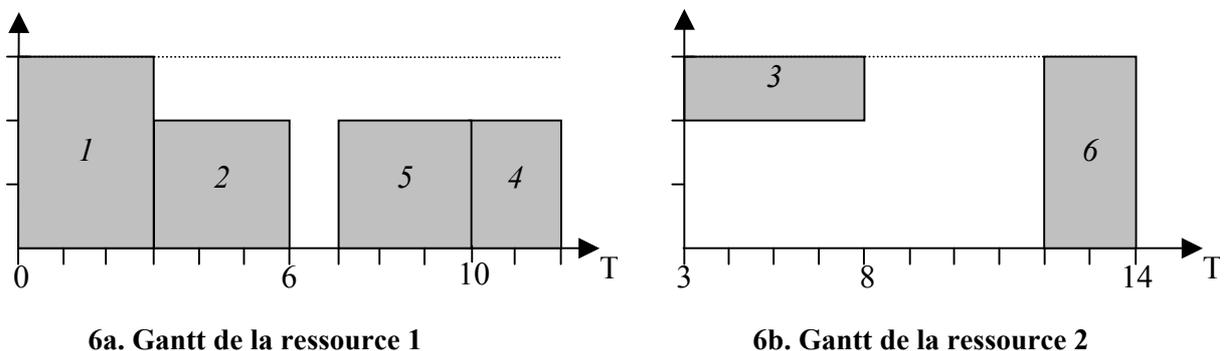


Figure IV-6 Ré-ordonnancement du scénario 2

Scenario 3 :

Un aléa sur la tâche 3 d'une durée de cinq unités de temps détecté à la fin de la tâche 3 à la date $t_a = 5$.

Dans ce scenario, le jeton créé par l'aléa est $\langle P3_5 \rangle$. Dans un premier temps, le réseau se comporte comme dans le scénario 2. La fonction `Propage` du centre CD_1 est donc activée par un jeton $\langle T4_4 \rangle$, représentant la date de disponibilité de la tâche 4, mais le problème de satisfaction de contraintes de niveau 1 est insatisfait compte tenu des temps de réaction. En effet, les intervalles de niveau 1 disponibles pour l'exécution des tâches 4 et 5 sont respectivement $[10, 12]$ et $[8, 12]$ compte tenu de la date de détection de l'aléa $t_a = 5$ et des temps de réaction mis en jeu $\delta = 3$. En revanche la propagation de contraintes de niveau 2 donne pour les intervalles d'exécution des tâches 4 et 5 les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} r'_4 &= 10 \text{ et } d'_4 = 14 \\ r'_5 &= 8 \text{ et } d'_5 = 12 \end{aligned}$$

En effet, la tâche 4 au niveau 2 de propagation ne finit pas nécessairement avant le début de la tâche 6. Au niveau 2 de propagation, il y a remise en cause de l'ordre global des tâches. Dans ce cas, la fonction `Propage` du centre de décision CD_1 donne lieu à la satisfaction du problème de niveau 2. Toutefois, certaines variables de décision ont changé. Il n'y a donc pas de création de jeton $\langle Sat_2 \rangle$, mais il y a création de plusieurs jetons qui correspondent aux variables dont les valeurs ont été modifiées. Concrètement, dans cet exemple la fonction `Propage` de CD_1 génère deux jetons liés aux variables de décision de la tâche 4. Le premier jeton concerne l'augmentation de la date de début au plus tôt de la tâche 4. Ce jeton est $\langle T4_6 \rangle$. Le second jeton créé correspond à l'augmentation de la date de fin au plus tard de la tâche 4, ce jeton est $\langle C4_2 \rangle$. Ensuite, ces deux jetons sont envoyés simultanément vers le centre de décision CD_2 . Le jeton $\langle C4_2 \rangle$ implique la non satisfaction du problème généré par les propagations de contraintes de niveau 1 et 2. La fonction `Propage` réalise donc un contrôle niveau 2 pour lequel on a besoin de l'intervalle disponible pour la tâche 4.

IV.2 Implémentation des algorithmes de planification et d'ordonnement

Dans cette partie, nous présentons les choix réalisés pour l'implémentation des algorithmes utilisés pour simuler l'activité de décision.

Nous exposons les choix relatifs à la planification des produits, réalisée à l'aide de l'outil Cplex 8.0 [CPL 02], sur un horizon donné.

Puis, l'outil d'ordonnement est présenté en insistant sur le principe du ré-ordonnement.

IV.2.1 Planification

Nous donnons en premier lieu les raisons qui nous ont amenés à réaliser la planification sur des périodes multiples. Dans la seconde section de cette partie, nous donnons la stratégie de recherche utilisée par Cplex pour résoudre le problème.

IV.2.1.1 Périodes multiples

Nous avons choisi de réaliser la planification sur plusieurs périodes. En effet, nos expérimentations nous ont amené à découper l'horizon de planification afin de réduire la taille des problèmes que nous souhaitons résoudre. Le problème pour une seule période égale à l'horizon de planification consiste à trouver au moins une solution qui est une borne inférieure pour le problème d'ordonnancement. Si une telle solution n'existe pas, alors il est prouvé qu'il n'y a pas d'ordonnancement réalisable. Les instances que nous avons traitées ont rapidement rendu le problème trop long à traiter pour certaines instances, c'est pourquoi le problème a été réduit en planifiant les tâches période par période.

De ce fait, il est nécessaire de modifier les paramètres de la stratégie de recherche initialement prévue pour la résolution d'un problème de satisfaction de contraintes. Nous avons choisi de nouveaux paramètres plus efficaces pour la résolution de ce type de problème. Ces paramètres sont explicités dans la section suivante sur le paramétrage de la stratégie de recherche. La méthode retenue consiste à réaliser le programme linéaire présenté au chapitre III.2.2 pour chaque période par ordre chronologique en prenant en compte les tâches réalisables sur chaque période en fonction des intervalles d'exécution donnés par la propagation de contraintes. Les choix réalisés pour la première période conditionnent fortement le résultat de la période suivante. Le problème multi-périodes nécessite donc de trouver une solution performante pour chaque période.

Par ailleurs, le choix d'une planification multi-périodes induit deux actions nécessaires au fonctionnement de la méthode.

Premièrement, la réalisation d'une tâche sur plusieurs périodes nécessite d'imposer des consommations obligatoires sur ces périodes sous peine d'obtenir une insatisfaction sur les périodes suivantes induite uniquement par les choix réalisés aux périodes précédentes et non par la capacité des ressources. Par exemple, si l'intervalle d'exécution d'une tâche s'étend sur deux périodes de temps, il existe une charge minimale à réaliser sur la première période qui correspond à la différence entre la charge totale de cette tâche et la charge maximale réalisable sur la seconde période, sinon la charge de la seconde période n'est pas réalisable compte tenu de l'intervalle de temps disponible. On ajoute donc des contraintes relatives à la charge minimale à réaliser sur une période pour les tâches dont l'intervalle d'exécution s'étend sur plus d'une période.

Deuxièmement, la durée des intervalles choisis n'est pas indépendante des instances du problème. En effet, lorsque l'intervalle d'exécution d'une tâche s'étend sur plus de deux périodes, il n'est plus possible de définir des charges minimales à réaliser sur chacune des périodes (cf. III.2.1.4). C'est pourquoi, nous imposons des durées pour chaque période de telle sorte que l'intervalle d'exécution de toutes les tâches ne s'étende pas sur plus de deux périodes.

IV.2.1.2 Paramétrage de la stratégie de recherche

La planification est réalisée à l'aide d'Ilog Cplex 8.0. Cplex offrant plusieurs paramétrages différents, il nous a fallu choisir entre plusieurs options possibles. Pour le problème de planification à périodes multiples, nous ne cherchons pas la preuve que la solution trouvée soit optimale. Cependant, une solution dont la performance est trop éloignée de la valeur optimale n'est pas non plus souhaitable car le problème multi-périodes est déjà une relaxation du problème à période unique.

Nous avons donc réglé les paramètres de Cplex de sorte qu'il cherche la meilleure solution possible (Mipemphasis (bestbound)) en ajoutant une condition de sortie sur la valeur d'écart où l'écart est la différence entre la solution obtenue et la borne inférieure calculée par

relaxation des contraintes d'intégrité sur les variables binaires. La condition sur l'écart de la solution calculée est certes limitative pour la qualité des solutions mais permet des gains importants en temps de calcul. Cette valeur a été choisie expérimentalement et est le résultat d'un compromis entre le temps nécessaire à l'amélioration de la solution et le gain en qualité de la solution. Clairement, on ne souhaite pas chercher de solution nécessitant plus de cinq minutes de calcul par période, mais on ne souhaite pas non plus obtenir des résultats de qualité trop mauvaise.

Les observations réalisées ont mis en évidence une consommation de temps importante au delà de 1% d'écart. Nous avons donc choisi une limite sur la valeur de l'écart entre la solution et la borne inférieure égale à 1%. Cette limite est appliquée à chaque sous problème résolu, c'est-à-dire à chaque période de planification.

A titre illustratif pour un problème à dix périodes de trente jours, on estime la perte de performance liée à ce paramètre pour chaque période à 0,3 jours. La perte maximale est donc égale dans le pire des cas, à 3 jours sur les 300 jours de l'horizon total de planification.

IV.2.2 Ordonnancement

Dans cette partie, nous expliquons en premier lieu la création des aléas réalisée à partir de l'outil d'ordonnancement. Ensuite, nous donnons les méthodes utilisées pour réaliser les ré-ordonnements et leur évaluation.

IV.2.2.1 Création des aléas

Pour simuler des aléas, nous avons opté pour la création de pannes machines. Pour cela, nous fixons la consommation de la machine, à partir de la date d'apparition de l'aléa, égale à sa capacité totale, pendant toute la durée de l'aléa. La tâche touchée par cet aléa est alors déclarée préemptive et l'on force la deuxième partie de la tâche à commencer dès la fin de la panne. Afin d'analyser la réactivité du système de pilotage, nous effectuons un test d'une centaine de simulations avec des aléas différents. Les aléas diffèrent selon leur date d'apparition, les ressources qu'ils touchent et leur durée.

IV.2.2.2 Ré-ordonnement

Le problème de ré-ordonnement consiste à choisir un ordre des tâches à réaliser en séquence. Le nouveau problème est donc un problème réduit dans lequel on ne trouve plus que les tâches qui n'auront pas encore été commencées à la date de début de la propagation. Cette date correspond à la date de détection de l'aléa t_a à laquelle sont ajoutés les temps de réaction impliqués dans le processus de réaction. Les domaines d'admissibilité sont recalculés à partir des tâches précédemment placées et des déductions réalisées par la propagation de contraintes. Pour ce faire, nous utilisons Solver 5.2 d'Ilog [SOL 02] en y intégrant les contraintes dues au temps total de réaction calculées lors de chaque propagation de contrainte.

IV.3 *Maquette informatique*

IV.3.1 Liaison entre les applications

Les deux applications ont été réalisées sur la plate-forme de développement Visual Studio C++ 6.0 de Microsoft. La simulation du réseau de Petri a été réalisée en utilisant un outil développé dans le cadre d'un projet à l'école d'ingénieur ENSIAME [DAU 02] dans laquelle sont ajoutés les fonctions de propagation et le calcul de l'ordonnancement à l'aide de Ilog Solver 5.2. La simulation du réseau de Petri est stoppée si un jeton est tiré à la transition précédant la propagation. Cette transition est particulière, elle est numérotée par l'indice du centre de décision afin d'importer les données relatives au sous problème de ce centre de décision. Le jeton tiré par cette transition contient les données relatives à la nouvelle contrainte. Ces données portent sur le numéro de la tâche touchée par l'aléa contenu par la nom du jeton. Par exemple C12₂ est un jeton représentant la date de fin au plus tard de la tâche 12. Ces données concernent également la valeur de la nouvelle contrainte. Celle-ci est représentée par l'indice du jeton qui donne l'écart entre la nouvelle et l'ancienne valeur.

Pour ce qui concerne l'ordonnancement proprement dit, il est réalisé lorsqu'un jeton <Sat_n> active la place décision d'un centre. Les places de décision sont indicées par le numéro du centre de décision. L'activation de cette place permet alors de lancer le calcul de l'ordonnancement avec les nouveaux intervalles disponibles pour chaque tâche relatifs au niveau n.

IV.3.2 Algorithme général pour l'analyse de la réactivité

L'algorithme général que nous proposons suppose qu'un ordonnancement ait été réalisé en prenant en compte les objectifs donnés par la planification. Cet ordonnancement permet de définir les intervalles d'exécution pour chaque tâche selon le niveau de propagation. Ainsi trouvons nous des intervalles différents si l'on prend en compte l'ordre local et global (niveau 0), l'ordre global uniquement (niveau 1) ou si l'on ne prend pas en compte les séquences préalablement posées par l'ordonnancement initial (niveau 2). Nous supposons également que chaque centre de décision connaît le graphe représentant le problème central d'ordonnancement, c'est-à-dire qu'il connaît la durée des tâches avec lesquelles certaines des tâches qu'il pilote sont en disjonction et l'intervalle initial de niveau 2 associé à chacune de ces tâches. L'ensemble de ces données a été fourni par le paramétrage du réseau présenté dans les parties précédentes. Les différentes étapes pour l'analyse de la réactivité sont présentées sur la figure IV-7.

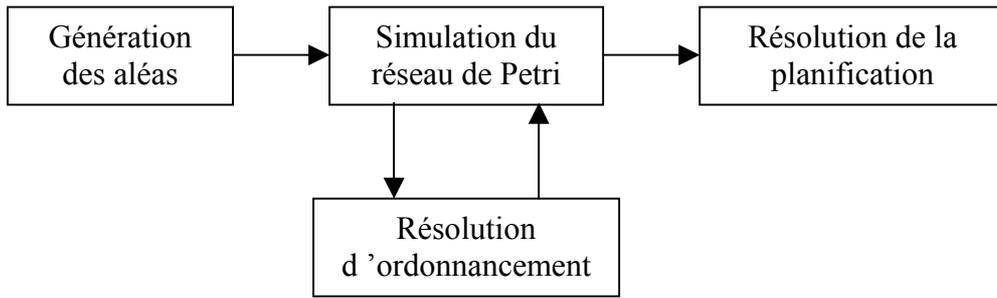


Figure IV-7 Schéma de l'algorithme pour l'analyse de la réactivité

La première étape consiste à générer les aléas selon la méthode présentée à la section IV.2.2.2.

La seconde étape génère le jeton associé à l'aléa qui lance la simulation du processus de décision comme nous l'avons présenté dans la première partie de ce chapitre. Cette étape a pour résultat la création d'un nouvel ordonnancement prenant en compte les nouvelles contraintes apportées par l'aléa et les contraintes liées au processus de réaction.

Enfin, la dernière étape récupère les résultats obtenus par le ré-ordonnement et réalise la planification avec les tâches restantes sur l'horizon restant en ajustant les capacités des ressources en fonction des consommations induites par l'ordonnement.

IV.4 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté dans la première partie l'instanciation du réseau permettant de simuler le processus de décision. La mise en œuvre du réseau concerne notamment la manière dont nous représentons les contraintes données par le problème d'ordonnement en terme de flux d'information par la définition des domaines des transitions et des fonctions associées aux arcs du réseau de Petri.

La deuxième partie de ce chapitre a permis d'exposer les détails des algorithmes de planification et d'ordonnement. Nous avons notamment expliqué les paramétrages de la stratégie de recherche de l'algorithme de planification et la méthode utilisée pour réaliser le ré-ordonnement.

Enfin dans la troisième partie, nous avons présenté l'intégration de l'outil de simulation du processus de décision et des outils d'activités de décision.

Chapitre V

Application

V.1	Présentation du modèle	90
V.1.1	Structure de décision étudiée	90
V.1.2	Instances du modèle	91
V.1.2.1	Les temps de réaction	91
V.1.2.2	Le problème d'ordonnancement	93
V.2	Protocole expérimental	94
V.2.1	Date de détection et durée de l'aléa	94
V.2.2	Affectation des tâches	95
V.2.3	Disponibilité des informations	97
V.3	Résultats et commentaires	98
V.3.1	Temps de réaction et durée des aléas	98
V.3.1.1	Impact de la durée des aléas sur la réactivité	98
V.3.1.2	Impact des temps de réaction sur la réactivité	100
V.3.2	Affectation des tâches	102
V.3.2.1	Type d'affectation par produit	102
V.3.2.2	Type d'affectation par métier	103
V.3.3	Disponibilité des informations	104
V.4	Conclusion du chapitre	105

Chapitre V

Application

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la mise en œuvre du modèle de pilotage réactif. Ce modèle générique pour la simulation des systèmes de pilotage de production permet d'intégrer des contraintes issues de la simulation de la prise de décision dans le problème de ré-ordonnancement.

Ce chapitre présente un problème de maintenance d'une rame TGV à l'EIMM d'Hellemmes. Nous mettons en évidence les contraintes dues aux différentes décisions prises ce qui nous permet de classer les paramètres du système de pilotage selon leur influence sur la réactivité.

Dans la première partie de ce chapitre, nous modélisons la structure de l'EIMM présentée au chapitre I en nous appuyant sur les activités de maintenance des TGV Paris Sud Est traités en opération mi-vie lors des années 2001 et 2002.

La méthodologie de la simulation est détaillée dans la seconde partie, où nous précisons comment sont étudiés les différents paramètres influençant le réactivité du système de pilotage.

Enfin les résultats et leur analyse sont présentés dans la dernière partie.

V.1 Présentation du modèle

Nous rappelons en premier lieu le modèle de l'EIMM d'Hellemmes qui a été implémenté. Ce modèle est constitué d'un modèle du système de pilotage et d'un modèle du système opérant. Ensuite, nous donnons les instances de ce modèle. D'une part, ces instances concernent les données liées à la circulation des informations comme la structure et les temps de réaction du système de pilotage. D'autre part, elles concernent les données liées au problème d'affectation des ressources et le graphe représentant la gamme opératoire.

V.1.1 Structure de décision étudiée

Nous avons restreint l'étude de la réactivité du système de pilotage en ne nous intéressant qu'aux unités de travail nécessaires à la maintenance d'un type d'engin. Les autres unités de travail ne partageant pas de contraintes de production ne sont pas incluses dans cette étude. Bien qu'un TGV Sud Est comporte normalement 8 remorques, nous avons choisi de travailler sur une instance réduite à 4 remorques. Cette simplification n'est pas réductrice pour la mesure de la réactivité du système de pilotage. Avant tout nous souhaitons ici privilégier l'occupation des ressources qui travaillent sur la même rame. En fait, il s'agit de définir un problème où toutes les ressources ont une productivité comparable sur la durée d'immobilisation de la rame. En utilisant un TGV à 8 remorques nous augmentons la combinatoire du problème sans pour autant changer la nature même de nos contraintes. En outre, pour obtenir des résultats entièrement satisfaisants nous avons choisi de résoudre le problème optimalement avec ILOG Scheduler 5.2 (un résolution approchée étant aussi possible sans pour autant apporter d'informations supplémentaires pour l'analyse de la réactivité du système de pilotage de l'EIMM).

Les unités de travail mises en relation pour la réalisation de la maintenance de ces engins sont représentées par la figure V-1. Cette figure montre également les flux de décision et d'information possibles entre chaque centre de décision. Une contrainte liant deux centres de décision différents génère un lien d'information entre ces deux centres. Cependant ce lien doit être cohérent avec les flux possibles. S'il n'existe pas de flux entre deux centres, l'information ne peut être transmise directement, mais uniquement par l'intermédiaire d'un centre de décision ayant des flux d'information ou de décision avec chacun des deux autres centres concernés.

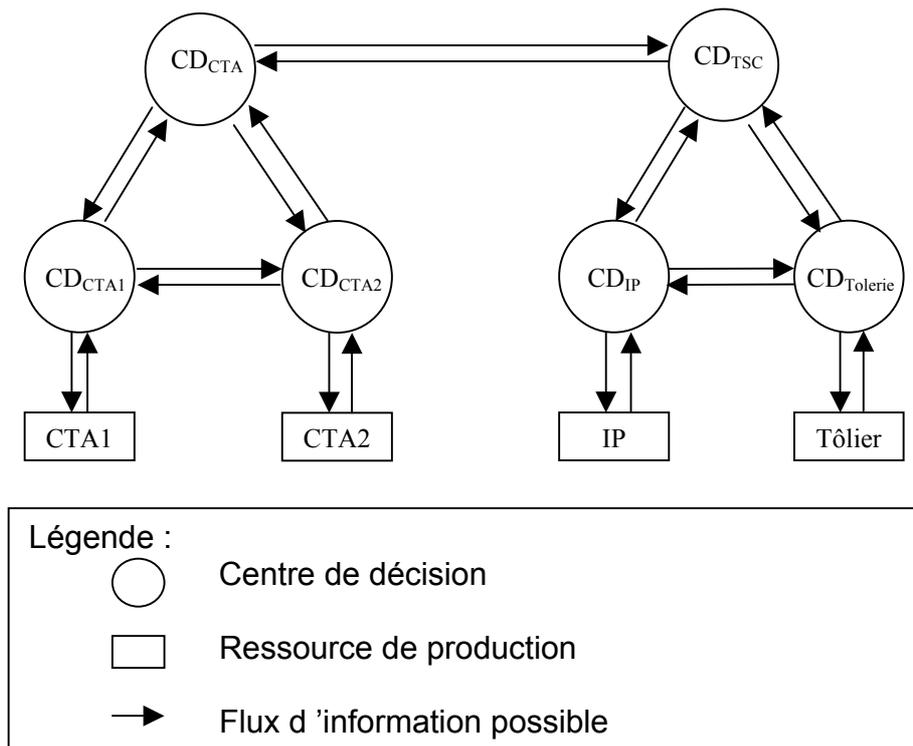


Figure V-1 Structure du système de décision étudié

Chaque centre de décision pilote une ressource de capacité unitaire. L'objectif des centres de décision CD_{CTA1}, CD_{CTA2}, CD_{IP}, CD_{TSC} correspondant aux dirigeants d'unité est la productivité de la ressource qu'ils pilotent ou plus précisément la minimisation des temps d'attente des ressources. Les centres de décision CD1 et CD2 représentent les adjoints au chef d'unité de production dont l'objectif est la minimisation de la durée d'immobilisation de la rame.

V.1.2 Instances du modèle

V.1.2.1 Les temps de réaction

Les temps de réaction variables, qui dépendent de la simulation et de la dynamique du problème, sont les temps d'élaboration du problème t_{elab} et les temps de communication t_c entre les centres de décision. Les temps de réaction constants correspondent aux temps de

descente t_{di} et de montée t_{ri} des informations, aux temps de déclenchement du centre de décision t_{dec} et de mise en œuvre des décisions t_{mo} .

a) Temps de réaction variables

L'évaluation sur le terrain des temps d'élaboration n'est pas aisée. Il existe beaucoup de facteurs influençant le temps de prise de décision humaine, par exemple le fait d'avoir déjà rencontré une situation similaire ou non. Pour appliquer la méthode dans le cas industriel, nous avons donc dû considérer les activités de décision réalisées par des responsables d'unité. Pour cela, nous avons élaboré un outil informatique (Annexe 3) permettant aux décideurs de contrôler l'applicabilité de leurs décisions. Il a permis d'évaluer le temps nécessaire aux dirigeants d'unité pour vérifier la faisabilité des décisions prises et la cohérence des solutions apportées. La cohérence porte notamment sur l'occupation des ressources et plus précisément sur l'ajustement entre la charge et leur capacité quotidienne. Les temps d'élaboration des décisions pour chaque centre correspondent donc au temps d'utilisation de cet outil dont la valeur est proportionnelle au nombre de tâches qu'il pilote. On considère que les centres de décision d'un certain niveau hiérarchique pilotent l'ensemble des tâches des centres de décision sous leur responsabilité. Par conséquent, plus le niveau hiérarchique d'un centre de décision est élevé, plus la durée d'élaboration des décisions est grande. Compte tenu du faible nombre de tâches affectées aux différents centres de décision sur le problème à quatre remorques, on considère les temps d'élaboration des décisions constants et égaux pour les centres d'un même niveau hiérarchique. Les temps d'élaboration pour chaque niveau de décision sont donnés par le tableau V-1.

Par ailleurs, les temps de communication entre centres de décision sont considérés comme négligeables. En effet, l'utilisation du téléphone est devenue courante et a raccourci les temps de communication.

Dans ce modèle, les temps de réaction variables comme le temps d'élaboration sont donc fixés pour chaque niveau de décision et négligés pour le cas des temps de communication. On pourra alors les prendre en compte dans le problème de ré-ordonnement sans simuler le système de pilotage.

b) Temps de réaction constants

Les temps de montée et de descente des informations sont proportionnels à la distance entre le lieu de réalisation d'une tâche et le lieu où se trouve la personne représentée par le centre de décision. Cette distance est divisée par la vitesse d'un piéton (4km/h) pour connaître le temps de transfert des informations car les opérateurs qui détectent les aléas ne sont pas équipés de téléphone.

Les temps de déclenchement correspondent au temps de détection des aléas et les temps de mise en œuvre au temps de mise en place des engins et des outillages nécessaires à la réalisation des tâches. Ils sont parfois importants surtout si la réalisation des tâches impliquées dans le ré-ordonnement comportent des consignes de sécurité particulières. L'ensemble des temps de réaction sont récapitulés par le tableau V-1. Dans la suite de ce chapitre, nous utilisons le terme de temps de réaction de la boucle locale pour désigner le temps totale de réaction du niveau UT.

	t_{dec}	t_{ri}	t_{elab}	t_{di}	t_{mo}
Niveau UT	1	1	0	1	1
Niveau UP	0	0	1	0	0
Niveau établissement	0	1	2	1	0

Tableau V-1 Récapitulatif des temps de réaction en heures

V.1.2.2 Le problème d'ordonnancement

Pour le problème d'ordonnancement lui-même, nous introduisons les caractéristiques de la gamme des opérations de maintenance et les affectations des ressources qui sont fixées au début de chaque simulation.

a) Gamme opératoire

Le problème consiste donc à ordonnancer les tâches de maintenance mi-vie pour quatre remorques d'un TGV PSE. La gamme opératoire simplifiée pour une remorque est représentée par le graphe de la figure V-2. Les durées opératoires sont données par le tableau V-2. Chaque tâche consomme une unité de la ressource qui lui est affectée et chaque ressource a une capacité unitaire. De ce fait, on ne peut réaliser des tâches d'une même remorque en même temps.

Nous nous plaçons donc dans le cas disjonctif puisque deux tâches d'une même remorque ou affectées à une même ressource ne peuvent être réalisées simultanément. Il y a donc des arcs disjonctifs entre chaque paire de tâches d'une même remorque dont l'ordre n'est pas imposé par un arc de précédence. Ces tâches forment des ensembles disjonctifs maximaux, c'est-à-dire des ensembles de tâches pour lesquelles il faut choisir un ordre pour toutes les tâches appartenant au même ensemble disjonctif maximum.

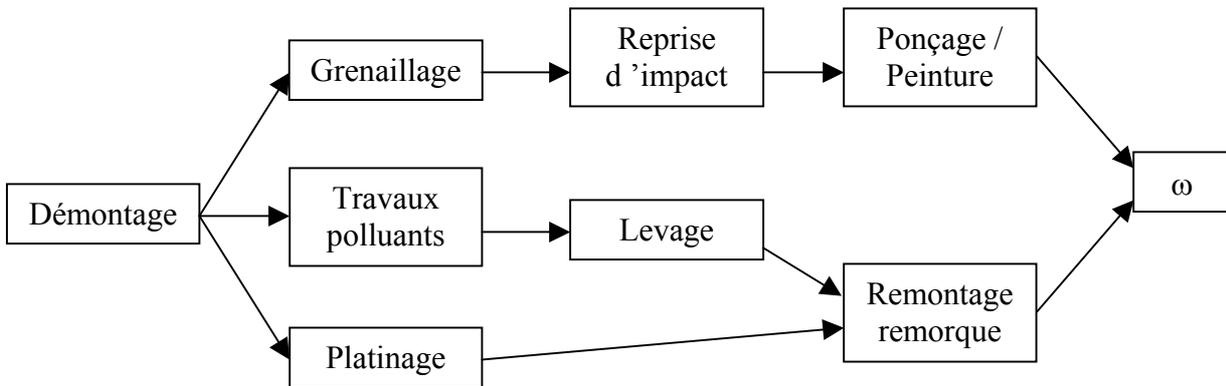


Figure V-2 Graphe du problème d'ordonnancement pour une remorque

En outre, les tâches affectées aux mêmes ressources appartiennent également à un même ensemble disjonctif maximum compte tenu des consommations et des capacités unitaires dans ce problème.

b) Affectation des tâches

Dans toutes les simulations effectuées, les affectations des tâches aux ressources sont choisies au préalable et ne changent pas au cours du ré-ordonnancement. Elles sont données, pour les simulations initiales portant sur la date de détection et la durée de l'aléa de la section V.3.1, par le tableau V-2.

Ressources	Tâches affectées	Durée opératoire en heures	Remorques
CTA1	Démontage	24	1 et 2
	Platinage	8	
	Levage	24	
	Remontage remorque	24	
CTA2	Démontage	24	3 et 4
	Platinage	8	
	Levage	24	
	Remontage remorque	24	
IP	Grenaillage	16	toutes
TSC	Travaux polluants	8	toutes
	Reprise d'impact	16	
	Ponçage / Peinture	21	

Tableau V-2 Affectation des tâches aux ressources

V.2 Protocole expérimental

Dans cette partie, nous explicitons les paramètres du modèle influençant la réactivité du système de pilotage

Parmi ces paramètres, nous nous intéressons particulièrement, dans la première partie, à la date de détection des aléas par rapport à la date de fin des tâches touchées par les aléas. Nous examinons également les paramètres liés aux temps de réaction entre les différents sous systèmes du système de pilotage.

Dans la deuxième partie, nous présentons la méthodologie utilisée pour l'analyse de l'impact des affectations des tâches aux unités de travail influant sur le volume d'informations à diffuser dans le système de pilotage.

Enfin, la troisième partie s'attache à montrer comment des paramètres concernant les informations disponibles pour chaque centre de décision sont prises en compte dans la simulation du processus de ré-ordonnancement.

V.2.1 Date de détection et durée de l'aléa

Nous présentons la simulation de la réactivité du système de pilotage en fonction des paramètres liés à la durée de l'aléa et à sa date de détection.

La date de détection d'un aléa par rapport à la date de fin touchée par l'aléa est un paramètre important pour le ré-ordonnancement. On s'attend à ce que plus la différence entre la date de fin prévue de la tâche concernée et la date de détection de l'aléa est grande plus la réactivité est grande. En effet, le délai entre la date de détection de l'aléa et la date de fin de la tâche qu'il perturbe constitue un délai pour la réaction. Pour mesurer l'impact de ce délai de réaction, nous avons choisi de simuler des aléas détectés une heure avant la fin de la tâche qu'il perturbe et d'incrémenter le temps de réaction de la boucle locale.

A l'inverse, la durée de l'aléa est un paramètre qui agit sur la réactivité en fonction des instances du problème à résoudre. En effet, le nouveau problème consiste à ré-ordonner un

ensemble de tâches dont les dates de fin sont postérieures à la date de détection de l'aléa. Cet ensemble qui constitue les instances du nouveau problème à résoudre est fortement dépendant de l'aléa. On s'attend donc à voir une variation de la réactivité en fonction de la durée de l'aléa sans toutefois établir une correspondance entre les écarts de réactivité mesurés et la durée des aléas.

Afin de vérifier nos prévisions, nous avons réalisé deux simulations (cf. section V.3.1) pour mesurer les influences de chacun de ces paramètres :

- La première simulation compare les ré-ordonnements où les temps de réaction sont pris en compte dans le ré-ordonnement a priori au ré-ordonnement où ils ne le sont qu'a posteriori. Dans le cas du ré-ordonnement avec temps de réaction a posteriori, il s'agit d'ajouter les contraintes liées aux temps de réaction entre chaque paire de tâches dont les dates de début ont été modifiées sur la solution ré-ordonnée.
- La seconde simulation que nous présentons est la comparaison des réactivités entre les ré-ordonnements. Pour cela, nous prenons en compte a priori et a posteriori les temps de réaction en fonction de la différence entre la date de fin prévue de la tâche touchée et la date de détection de l'aléa. Dans cette simulation, nous présentons deux cas. Dans le premier, nous fixons une durée d'aléa de quatre unités de temps, c'est la durée du temps de réaction de la boucle locale. Dans le second cas, nous choisissons une valeur supérieure au temps de réaction de la boucle globale, fixée à douze unités de temps.

V.2.2 Affectation des tâches

Dans cette section, nous montrons la mesure de l'impact de l'affectation des tâches aux centres de décision. Cette affectation influence la réactivité du système de pilotage. En effet, selon l'affectation choisie, le cheminement des informations relatives à une tâche peut être considérablement différent. De plus, nous présentons dans cette section les modifications de la structure de pilotage afin d'adapter la structure du système opérant au type d'affectation choisi. Pour comparer les réactivités associées à chaque type d'affectation, il est nécessaire de ne pas modifier les durées des tâches et les temps de réaction. Cependant, le changement du nombre de ressources que l'on doit réaliser pour simuler l'affectation par produit modifie les valeurs du C_{max} de la solution initiale. Or, le critère du C_{max} est utilisé pour calculer la réactivité et il doit être égal dans chacune des simulations que l'on souhaite comparer. Pour cela, nous avons introduit une tâche fictive à la fin de l'ordonnement dont nous modifions la durée afin d'obtenir la même valeur du C_{max} quelque soit l'affectation choisie. Cette tâche n'a pas d'influence sur nos simulations car l'ensemble des autres tâches la précède et aucune autre tâche ne la suit.

La première simulation est réalisée en affectant les tâches par produit, c'est-à-dire que les tâches d'un même engin sont affectées à un seul centre de décision. Plus précisément, on place l'ensemble des ressources nécessaires à la réalisation de la maintenance d'une remorque sous la responsabilité d'un même centre de décision. On retrouvera donc pour cette simulation (cf. section V.3.2) une structure du système de pilotage correspondant à deux centres de décision dotés des deux ressources nécessaires à la réalisation de l'ensemble des tâches pour les deux remorques qui leur sont affectées. On schématise cette structure par la figure V-3 suivante :

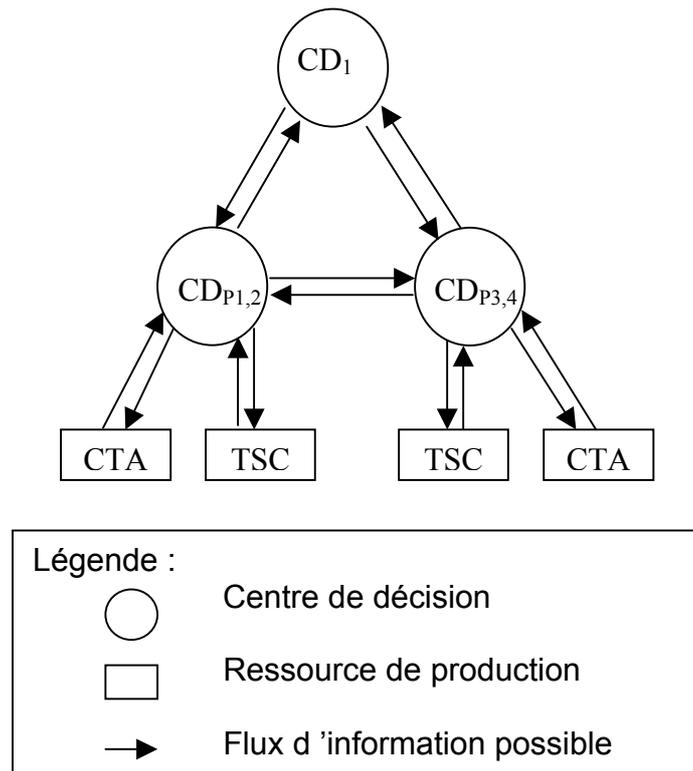


Figure V-3 Schéma de la structure du système de pilotage par produit

De plus, nous réalisons l'affectation des tâches aux ressources. Pour comparer les différents types d'affectation, nous affectons les tâches aux ressources de manière à conserver l'occupation relative des ressources comparable à celle obtenue par l'affectation initiale. Nous avons donc choisi d'affecter les tâches d'après le tableau V-3.

Ressources	Tâches affectées	Durée opératoire en heures	Remorques
CTA1	Démontage	24	1 et 2
	Platinage	8	
	Levage	24	
	Remontage remorque	24	
CTA2	Démontage	24	3 et 4

	Platinage	8	
	Levage	24	
	Remontage remorque	24	
TSC1	Grenaillage	16	1 et 2
	Travaux polluants	8	
	Reprise d'impact	16	
	Ponçage / Peinture	21	
TSC2	Grenaillage	16	3 et 4
	Travaux polluants	8	
	Reprise d'impact	16	
	Ponçage / Peinture	21	

Tableau V-3 Affectation des tâches aux ressources par produit

La seconde simulation est réalisée avec l'affectation des tâches par métier. Nous retrouvons une structure du système opérant comprenant autant d'unités de travail qu'il y a de métiers où chaque ressource est sous la responsabilité unique d'un centre de décision. Les quatre centres de décision de la structure initiale du système de pilotage sont donc concernées. En revanche, on modifie l'affectation des tâches aux ressources selon le tableau V-4 ci dessous :

Ressources	Tâches affectées	Remarques
CTA1	Démontage, Remontage remorque	toutes
CTA2	Platinage, Levage	toutes
IP	Grenaillage	toutes
TSC	Travaux polluants, Reprise d'impact, Ponçage / Peinture	toutes

Tableau V-4 Affectation des tâches aux ressources par métier

L'affectation des tâches modifie profondément les résultats obtenus, c'est pourquoi nous ne nous intéressons lors des simulations qu'aux réactivités de chacune des alternatives présentées ci-dessus sans nous attacher aux délais d'immobilisation calculés avec un nombre de ressources différent dans chacune de ces simulations.

V.2.3 Disponibilité des informations

Nous décrivons maintenant les paramètres concernant les informations disponibles auprès d'un centre de décision. Ces informations concernent les tâches sous la responsabilité des autres centres de décision liées par des contraintes de disjonction avec une tâche au moins du centre de décision considéré.

Pour rendre compte de l'importance des informations disponibles, nous réduisons la quantité et la qualité des informations disponibles et comparons les résultats obtenus sur les mêmes perturbations que dans les simulations initiales. Pour cette simulation, on interdit les propagations de niveau 2, c'est-à-dire que deux tâches en disjonction sous la responsabilité de deux centres de décision distincts ne peuvent faire l'objet d'une permutation que sur ordre

d'un centre de décision qui pilote les deux centres de décision impliqués dans la permutation des tâches.

V.3 Résultats et commentaires

V.3.1 Temps de réaction et durée des aléas

Dans cette partie, nous présentons les résultats des simulations permettant d'analyser l'impact de la durée des aléas puis l'impact de la durée des temps de réaction sur la réactivité du système de pilotage.

V.3.1.1 Impact de la durée des aléas sur la réactivité

Sur le graphique présenté sur la figure V-4, on observe les différences entre les performances des différents modes de ré-ordonnement :

- La courbe (1) représente la performance obtenue à la suite d'un ré-ordonnement avec des temps de réaction nuls, c'est l'optimum possible en fonction de la perturbation tirée aléatoirement.
- La courbe (2) donne les résultats avec prise en compte des temps de réaction a priori, c'est-à-dire au cours du processus de pilotage selon la règle énoncée au Chapitre III.3.2.1 :

$$t'_i \geq \min (t_i, t_a + t_r)$$

avec t'_i la nouvelle date de début de la tâche i ,
 t_i la date de début de la tâche i pour l'ordonnement initial,
 t_a la date d'apparition de l'aléa,
 t_r le temps de réaction total du système de pilotage.

- la courbe (3) montre les résultats avec prise en compte des temps de réaction a posteriori lorsque l'on tente d'appliquer la solution choisie sans les temps de réaction. Cette courbe correspond à l'application d'une solution en intégrant les temps de réaction a posteriori dans la solution choisie, c'est-à-dire au moment où l'on tente au niveau opérationnel d'appliquer la solution. Les temps de réaction sont ajoutés aux dates de début des tâches qui ont été modifiées selon la règle précédente en conservant l'ordre proposé par la solution.

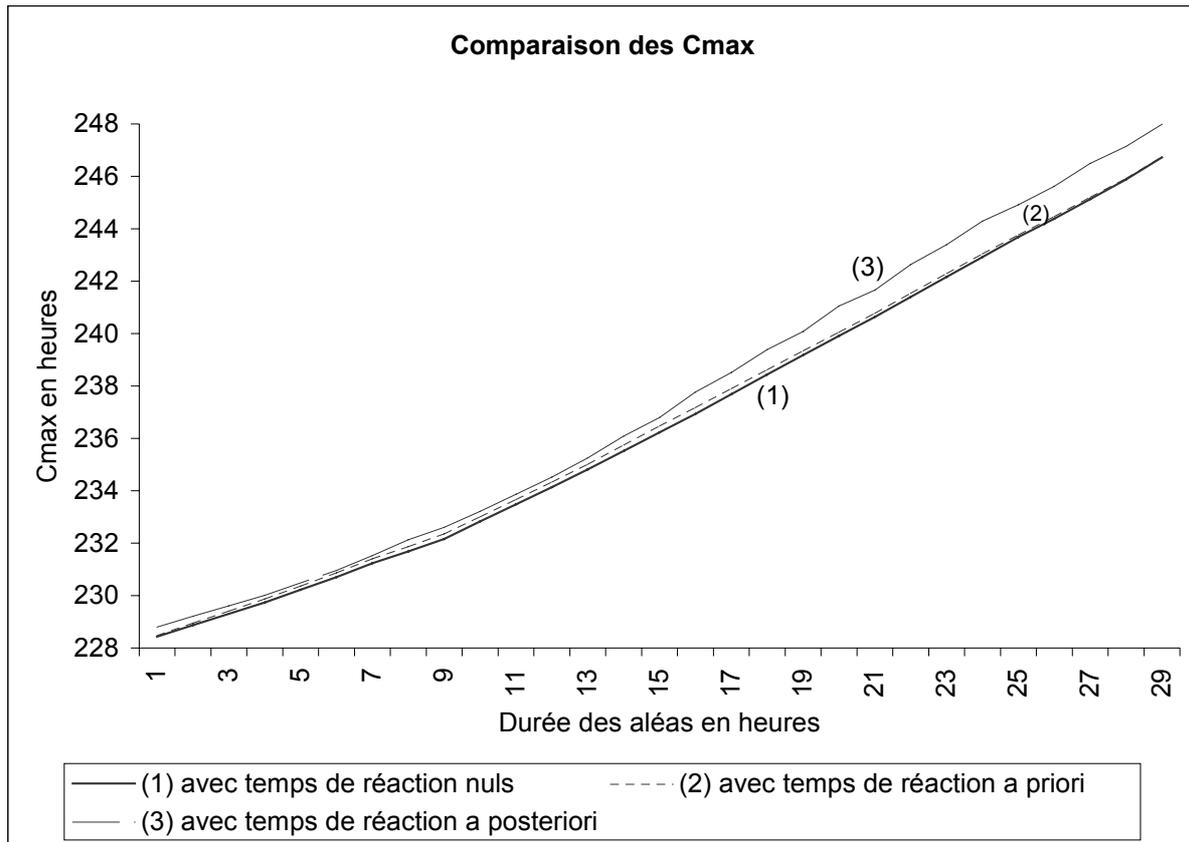


Figure V-4 Comparaison des ré-ordonnements en fonction de la durée des aléas

On observe que les délais pour la solution avec temps de réaction a posteriori sont constamment supérieurs aux délais dans le cas de la solution avec les temps de réaction pris en compte a priori dans la résolution du problème. Par ailleurs, on observe sur la courbe (3) un écart plus important lorsque la durée des aléas augmente. Dans ce cas précis, plus les aléas ont une durée importante plus le nombre de permutations proposées par la solution est grand. Par conséquent, la probabilité de dégrader le chemin critique par l'ajout a posteriori des contraintes de temps de réaction est plus grande. C'est pourquoi la performance moyenne obtenue est moins bonne lorsque la durée des aléas augmente. Cependant, on peut remarquer que l'écart maximum en performance n'excède pas 1,5 unité de temps, ce qui reste acceptable pour une implémentation pratique.

Lorsque l'on compare la réactivité de ces deux méthodes (figure V-5), on constate sur la courbe (1) de faibles variations de l'indice de réactivité. Ces variations sont dues d'une part à la spécificité des instances pour la réactivité de la solution avec temps de réaction a posteriori et à l'intégration des temps de réaction a posteriori. Deuxièmement, ces variations proviennent d'une dégradation de la mesure de réactivité en fonction de la durée de l'aléa. En effet lorsque la durée des aléas est grande, la solution propose davantage de permutations de tâches auxquelles seront ajoutées les temps de réaction ce qui dégrade la performance de la solution. A l'inverse, la solution avec temps de réaction a priori ne subit pas l'augmentation de la durée des aléas, elle commence à diminuer pour des aléas d'une durée inférieure à la moyenne des durée des tâches puis elle augmente lorsque les aléas ont une durée supérieure à la durée maximale des tâches. En effet, plus la durée de l'aléa est élevée et plus le temps disponible pour réagir de façon optimale est élevé et par conséquent meilleure est la réactivité.

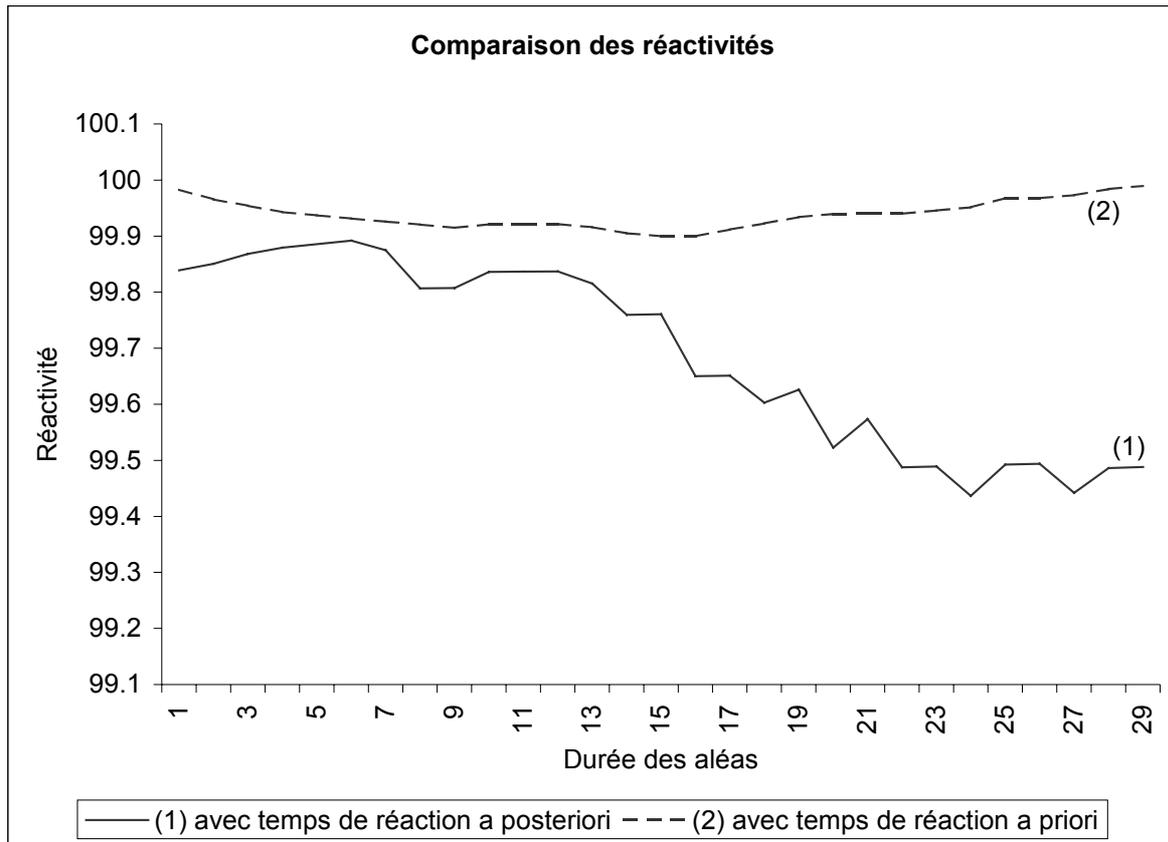


Figure V-5 Comparaison des réactivités en fonction de la durée des aléas

V.3.1.2 Impact des temps de réaction sur la réactivité

Pour mesurer l'impact de la date de détection de l'aléa, on fixe la différence entre la date de détection de l'aléa et la date de fin de la tâche touchée et on fait varier le temps de réaction.

La figure V-6 montre la relation entre la réactivité et les dates de réaction, c'est-à-dire les dates à partir desquelles on peut placer une tâche en prenant en compte le temps de réaction. La date de réaction correspond à la somme de la date de détection de l'aléa t_a et du temps de réaction t_r . La variation de la différence entre la date de réaction et la date de fin c_i de la tâche perturbée par l'aléa représente à la fois l'augmentation des temps de réaction et la diminution de la différence entre la date de détection de l'aléa et la date de fin de la tâche perturbée.

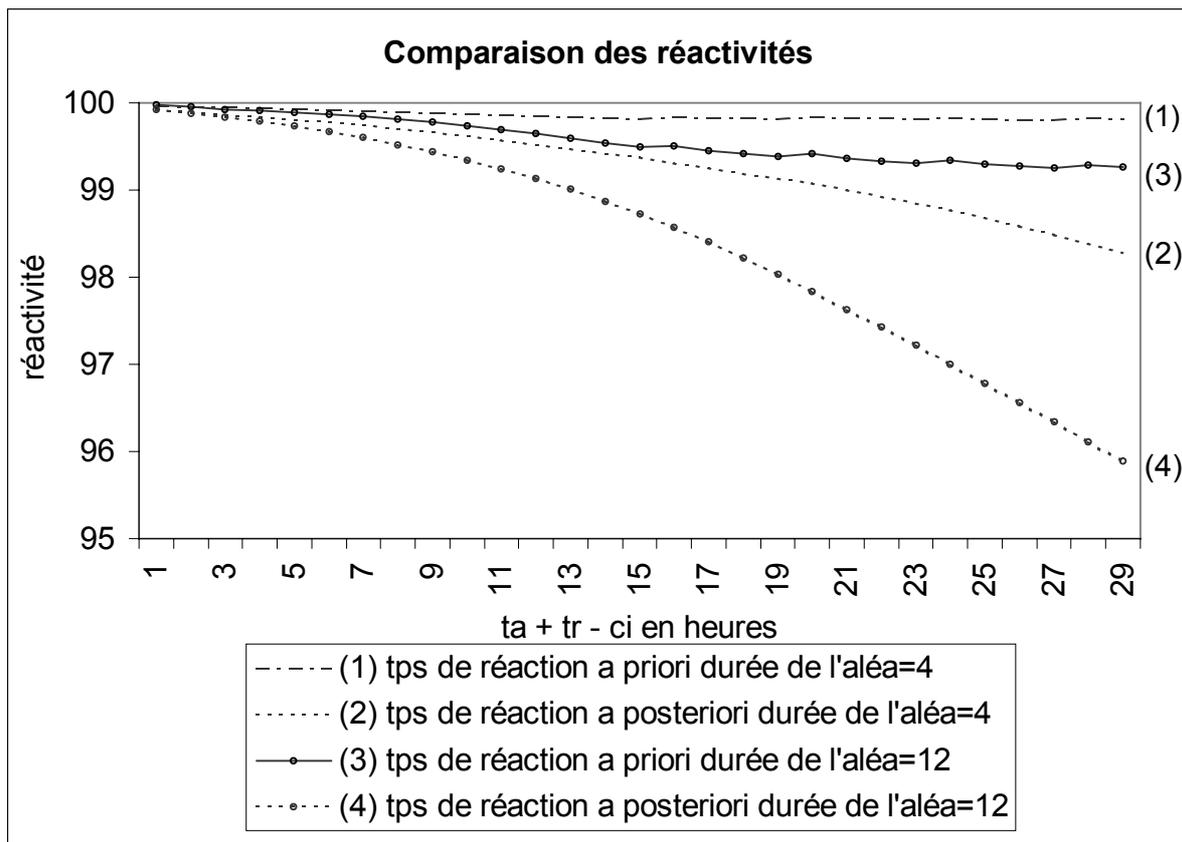


Figure V-6 Comparaison des réactivités en fonction des temps de réaction

Avec ta la date d'apparition de l'aléa, tr le temps de réaction total du processus de pilotage et ci la date de fin de la tâche i touchée par l'aléa.

La réactivité du ré-ordonnement avec prise en compte des temps de réaction a priori (courbe (3)) diminue constamment lorsque la date de réaction augmente pour une durée d'aléa fixée à douze unités de temps mais ne varie que de 0,1% pour un aléa d'une durée égale à quatre unités de temps (courbe (1)). En revanche, la réactivité du ré-ordonnement avec prise en compte des temps de réaction a posteriori varie d'avantage en fonction de l'augmentation des dates de réaction. Cette variation est plus significative lorsque l'on s'intéresse aux courbes (2) et (4) où les temps de réaction ont un impact important sur la courbe (4) de la réactivité avec prise en compte des temps de réaction a posteriori. Plus l'augmentation des dates de réaction est grande plus la réactivité décroît. Cela souligne la nécessité de prendre en compte les temps de réaction sous peine de donner des objectifs irréalisables et par conséquent de dégrader la performance en appliquant une solution incohérente au niveau du système opérant lorsque les temps de réaction sont grands.

Les tests réalisés ont permis de mettre en évidence que la réactivité d'un système de pilotage avec prise en compte des temps de réaction a priori ne dépend pas de la durée des aléas. En effet, lorsque la durée des aléas augmente, la réactivité avec prise en compte des temps de réaction a priori ne varie qu'entre 100% et 99,9% et la courbe (2) présentée sur la figure V-5. De ce fait, la mesure de réactivité que nous avons proposée est une mesure ne dépendant pas de la nature des aléas mais des ressources touchées et des temps de réaction associés. Cette mesure est donc comme nous l'attendions une mesure objective de la réactivité

globale du système de pilotage. En revanche, l'influence des temps de réaction est considérable notamment lorsque la durée des aléas est élevée.

V.3.2 Affectation des tâches

Deux types d'affectation différentes des ressources aux centres de décision ont été traités : par produit, puis par métier.

V.3.2.1 Type d'affectation par produit

Les contraintes de disjonction entre les tâches d'un même produit sont des contraintes endogènes du centre de décision qui en a la charge. Les temps de réaction pour ce type d'affectation sont donc majoritairement induits par la boucle locale de réaction. Par ailleurs, le changement du type d'affectation modifie la nature du problème à résoudre. En effet dans le cas d'une affectation par produit, le nombre d'arcs disjonctifs entre les tâches affectées à une même ressource est de 8,6 arcs disjonctifs en moyenne par ressource, alors que le nombre moyen d'arcs disjonctifs dans l'affectation initiale est de 48 arcs par ressource. On estime donc que le type d'affectation par produit réduit considérablement la flexibilité sur l'ordre des tâches.

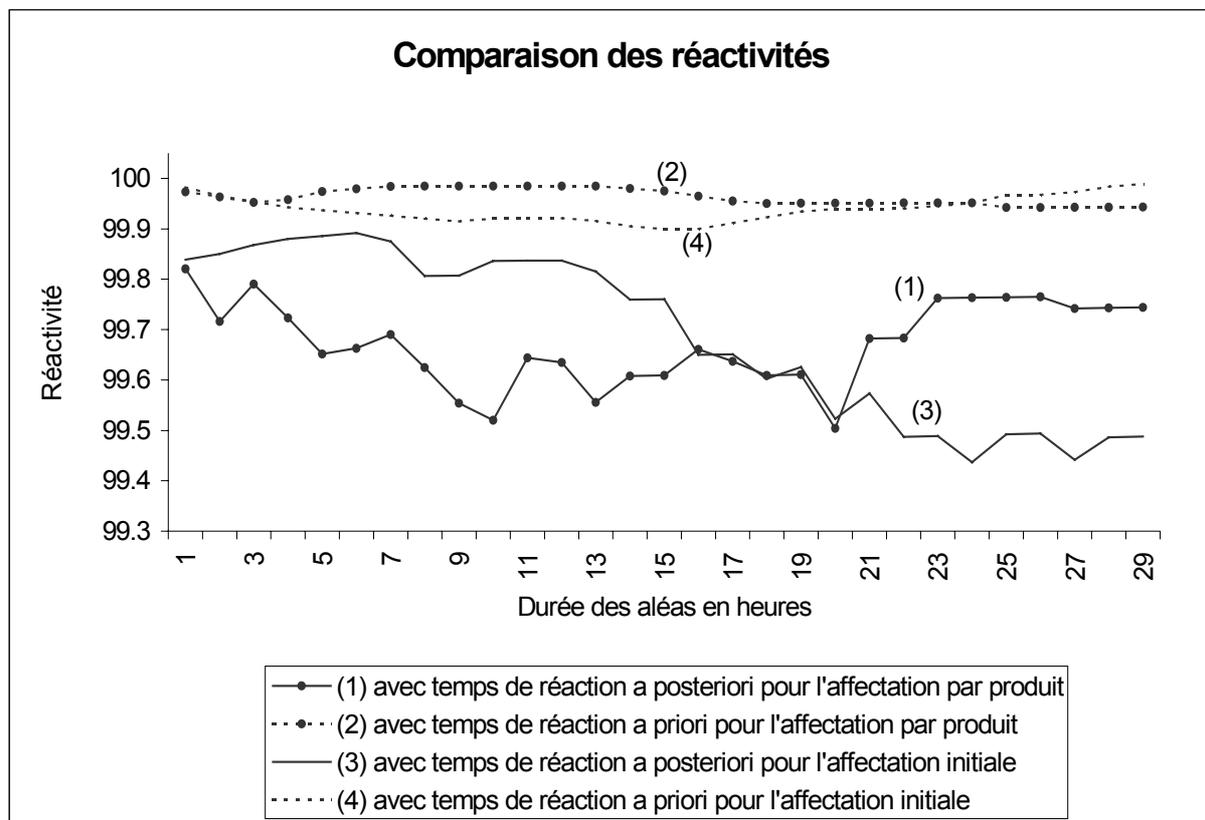


Figure V-7 Comparaison des réactivités selon une affectation par produit

La figure V-7 montre la réactivité obtenue en affectant les tâches par produit en fonction de la durée des aléas par rapport à la réactivité obtenue dans les simulations initiales. La

réactivité obtenue en prenant en compte les temps de réaction a priori (courbe (2)) est comparable à la réactivité obtenue par l'affectation initiale (courbe (4)). Dans le cas d'un type d'affectation par produit on obtient 99,96% en moyenne alors que cette même mesure pour le type d'affectation initiale était en moyenne de 99,93 %.

Ces résultats montrent que le choix d'une affectation par produit n'a que très peu d'influence sur la réactivité du système de pilotage. En effet, si le choix d'une affectation par produit favorise les réactions locales et met en jeu des temps de réaction minimum, la flexibilité associée à ce type d'affectation est beaucoup plus faible. Par conséquent, le gain sur les temps de réaction est atténué par le manque de flexibilité dégagé par ce type d'affectation.

Donc, si la réactivité est comparable en moyenne c'est principalement dû au fait que les temps de réaction sont induits à 75 % par les boucles locales de réaction.

V.3.2.2 Type d'affectation par métier

L'affectation par métier repose sur le fait qu'une ressource possédant une compétence donnée réalise les tâches nécessitant cette compétence sur l'ensemble des remorques. L'affectation choisie génère en moyenne 71,5 arcs disjonctifs par ressource. On estime donc que la flexibilité sur l'ordre des tâches est plus grande que dans le cas de l'affectation initiale.

La réactivité obtenue par l'affectation par métier est meilleure que la réactivité obtenue par l'affectation initiale. Dans ce cas, la flexibilité est grande et plusieurs choix sont possibles pour la réaction. L'algorithme utilisé favorisera donc les alternatives où la performance est meilleure, c'est-à-dire celles qui minimisent l'impact des temps de réaction.

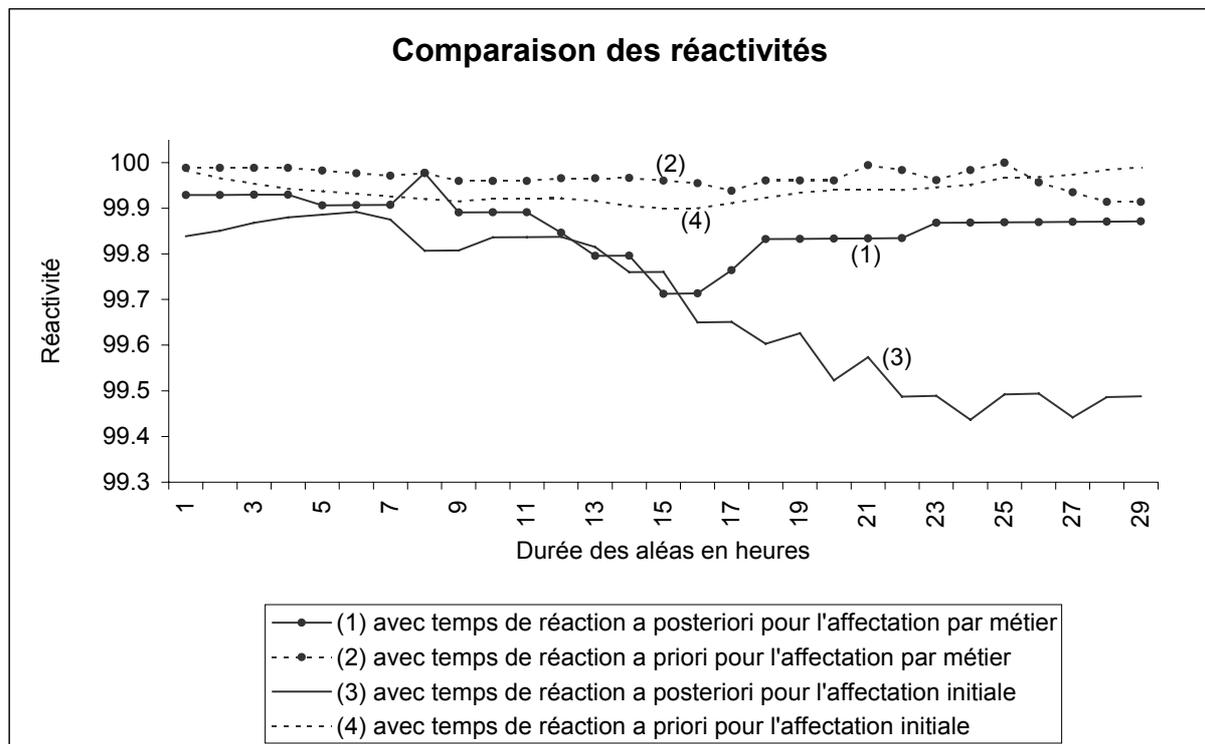


Figure V-8 Comparaison des réactivités selon une affectation par métier

Ces résultats mettent en évidence l'influence négligeable du choix des affectations. La mesure de la réactivité avec prise en compte des temps de réaction a priori a permis de

souligner que la réactivité n'est pas indépendante des instances du problème et notamment de la flexibilité que l'on peut espérer exploiter. Les résultats précédents ont montré que les affectations par produit permettent de conserver la réactivité du système de pilotage en minimisant les flux d'information. Cependant, la flexibilité induite par ce type d'affectation est très faible. Par ailleurs, une affectation par produit impose de dupliquer les compétences au niveau de chaque centre de décision ce qui induit un coût et d'avantage de temps d'attente pour ces ressources. Pour le cas des affectations par métier, la mesure de la réactivité avec prise en compte des temps de réaction a priori met clairement en évidence le gain de réactivité dû à la grande flexibilité du problème dans le cas des affectations par métier car le nombre de disjonctions est beaucoup plus grand dans ce type d'affectation. Cette flexibilité est utilisée par l'algorithme lors du ré-ordonnancement, mais dans la pratique, il est beaucoup plus difficile à un décideur humain de profiter au mieux de la flexibilité liée à ce type de problème.

V.3.3 Disponibilité des informations

Nous présentons ici les résultats des simulations réalisées en vue d'analyser l'impact, au niveau d'un centre de décision donné, du manque d'informations concernant les activités des autres centres de décision. Ces informations portent sur les intervalles de temps disponibles pour les tâches avec lesquelles un centre de décision est lié par une contrainte disjonctive.

Si un centre de décision ne possède pas ces informations, alors il ne peut pas réaliser des propagations de contraintes de type 2 présentées au chapitre IV. Par conséquent, la permutation de tâches disjonctives sous la responsabilité de centres de décision différents nécessite une réaction de type global faisant intervenir l'arbitrage d'un centre de décision de plus haut niveau hiérarchique. Sur la figure V-9, la réactivité moyenne en prenant en compte a priori les temps de réaction (courbe (3)) est moins bonne que celle obtenue sur les simulations initiales (courbe (2)). Néanmoins l'écart est très faible, même si pour ce type d'affectation les réactions globales sont majoritaires.

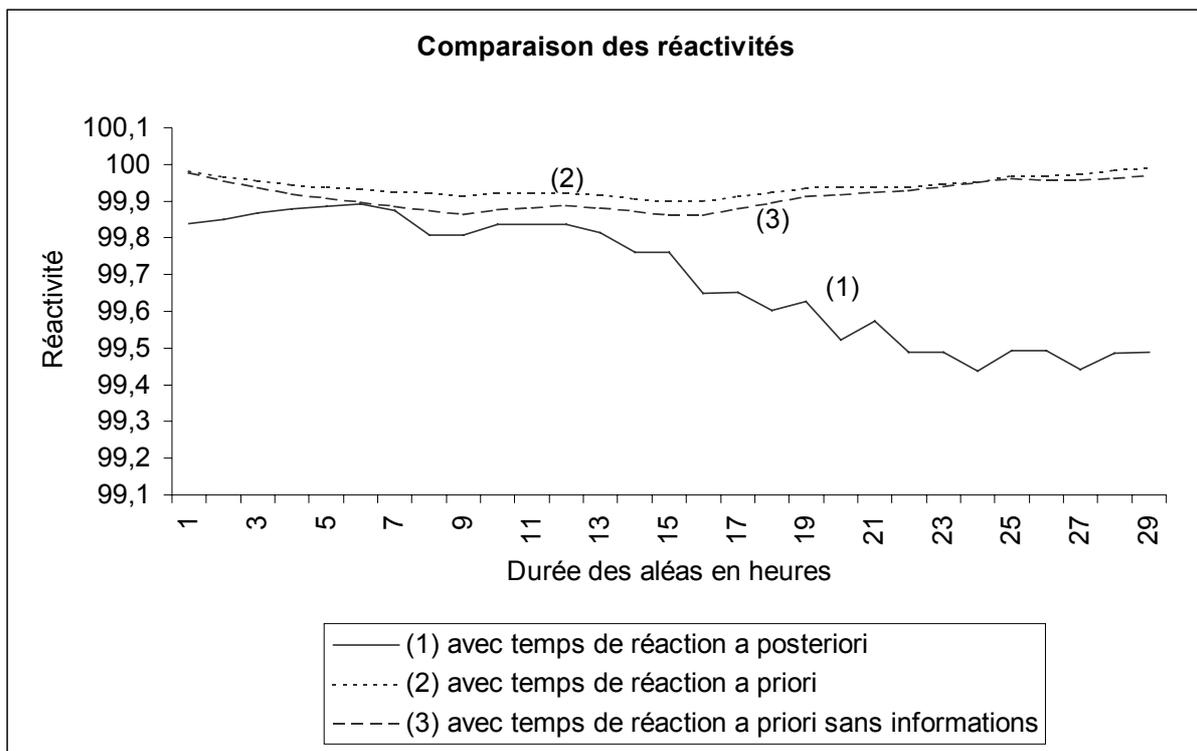


Figure V-9 Comparaison des réactivités sans informations

V.4 Conclusion du chapitre

Conclusion sur la thématique scientifique

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des simulations effectuées pour mesurer l'impact des paramètres liés à l'aléa, aux affectations définissant le problème d'ordonnancement et à la disponibilité des informations.

Ces simulations ont mis en évidence l'influence de l'affectation des ressources aux centres de décision sur la flexibilité et la réactivité du système de pilotage. De plus, la disponibilité des informations a montré la baisse de réactivité lorsque les centres de décision ne connaissent pas les activités des centres de décision qui leur sont liés. Enfin, les résultats ont montré que la durée des aléas n'est pas un paramètre qui influence de manière directe la réactivité avec prise en compte des temps de réaction a priori. En effet, même si la réactivité varie lorsque la durée des aléas augmente, on ne peut établir de corrélation entre la réactivité et la durée des aléas. En revanche, le temps de réaction ou plus précisément la différence entre la date de fin de la tâche touchée par un aléa et la date de réaction (date d'apparition de l'aléa + temps de réaction) est un facteur très influent pour la réactivité. La réactivité dépend alors d'avantage des temps de réaction et de la structure du système de pilotage que de la nature des aléas.

La mesure de la réactivité proposée correspond donc à ce que l'on souhaite identifier, c'est-à-dire la faculté que possède un système de pilotage, caractérisé par la structure et l'activité du système de décision, à répondre vite et bien à une perturbation.

Conclusion sur le problème industriel

En ce qui concerne les conclusions sur le cas pratique de l'EIMM d'Hellemmes, chacun de ces paramètres a donc une influence sur la réactivité.

D'une part, l'affectation des ressources aux centres de décision et des tâches aux ressources agit à la fois sur la flexibilité et la réactivité. Ce paramètre, choisi avant la résolution des problèmes d'ordonnancement, pose les limites en flexibilité et en réactivité qu'il sera possible d'atteindre lors du ré-ordonnancement. Si les réactivités sont comparables dans la théorie, pour le cas pratique de l'EIMM d'Hellemmes, on conjecture qu'une affectation par métier aura une réactivité moins bonne. En effet, un décideur humain n'aura pas les mêmes facultés qu'un algorithme de calcul pour traiter la complexité liée à la flexibilité générée par ce type d'affectation. Cette hypothèse est soutenue par les constats réalisés à l'EIMM d'Hellemmes où les modifications globales ne proposent que rarement des permutations de tâches. En revanche, la minimisation des flux et des temps de transmission d'information provoquée par une affectation par produit est directement exploitable sur le cas pratique d'Hellemmes.

D'autre part, les paramètres liés au temps de réaction et à la disponibilité des informations permettent d'atteindre une réactivité comprise dans les limites précédemment posées par l'affectation choisie. De ce fait, on peut dire que le paramètre le plus important pour la réactivité concerne les temps de réaction d'une manière générale. Les temps de réaction peuvent être améliorés en diminuant les temps de transmission des informations et les temps de communication, mais la date de détection des aléas par rapport à la date de fin des tâches est aussi importante, elle agit exactement de la même manière sur la réactivité. En d'autres termes, la rapidité de circulation des informations et l'anticipation de la détection des aléas par des procédures de diagnostic dès l'arrivée des engins permettent à part égale d'augmenter la réactivité pour le cas concret de l'EIMM d'Hellemmes.

Conclusion générale

Le contexte industriel actuel pousse les entreprises dans des démarches d'amélioration constante de leurs performances. Celles-ci reposent avant tout sur les aspects qualitatifs, temporels et quantitatifs des produits ou des services réalisés. La démarche systémique permet, à partir d'une analyse réalisée sur le site de l'EIMM d'Hellemmes et des objectifs industriels préalablement posés, d'extraire la problématique liée à la performance du pilotage des systèmes de production. Ce mémoire expose notamment les problèmes liés à l'amélioration des performances des systèmes de pilotage de la production du point de vue de la réactivité du système. L'étude des apports de la communauté scientifique met en évidence les intérêts et les manques de certaines approches en regard de notre problématique. Nous avons donc proposé un modèle, basé sur les modèles pertinents tels que les réseaux de Petri et l'approche par contraintes, pour la mesure de la réactivité des systèmes de pilotage. Cette mesure est validée par l'étude du cas concret de la maintenance des TGV à l'EIMM d'Hellemmes.

Nous avons tout d'abord défini les systèmes de production afin de comprendre les interactions entre les sous-systèmes le composant. L'analyse effectuée au sein de l'EIMM d'Hellemmes a permis de souligner ces interactions et les problèmes qu'elles génèrent. Nous avons à partir de ces considérations fait émerger une problématique scientifique liée à la réactivité des systèmes de pilotage.

La recherche d'outils et de modèles parmi ceux proposés par la communauté scientifique montre leurs intérêts et leurs carences pour apporter des réponses à l'ensemble des problèmes préalablement posés. Cette étude permet de définir des spécifications pour la mesure de la réactivité, traduisant la nécessité d'intégrer, dans les activités de pilotage, les paramètres temporels liés à la réalisation des processus de pilotage et d'intégrer l'activité de pilotage dans la simulation du processus de pilotage.

La définition des spécifications conduit à proposer un indicateur de la réactivité des systèmes de pilotage basé sur l'intégration des activités de décision et des caractéristiques du système de pilotage. Cette mesure nécessite l'adaptation de modèles existants et leur intégration au sein d'un modèle générique pour la simulation de systèmes de pilotage.

Par la suite, la mise en œuvre de l'outil destiné à la simulation du système de pilotage a été présentée à partir d'un exemple illustratif. Cela a permis de montrer la concordance entre les contraintes du problème de production et les flux d'informations à construire sur la structure de pilotage. De plus, le paramétrage du modèle a été exposé pour modéliser l'ensemble des processus décisionnels potentiels.

Enfin, nous avons utilisé le concept de l'intégration des données relatives aux processus de pilotage dans les activités de pilotage sur l'exemple concret de l'EIMM d'Hellemmes. Les résultats présentés ont permis de quantifier les liens entre les notions de flexibilité et de réactivité ainsi que l'importance des temps de réaction sur la réactivité du système de pilotage.

Ces travaux nous ont amené à réaliser des choix limitant la portée de notre contribution.

En premier lieu, même si le modèle générique d'un centre de décision proposé est simple, la multitude des processus de réaction engendrés par la distribution du problème

d'ordonnement complique le paramétrage du réseau. Il n'y a pas à proprement parler de limitations concernant la modélisation du système de pilotage en dehors de la capacité mémoire de l'ordinateur utilisé pour la simulation du système de pilotage et de la complexité apportée à l'utilisateur de l'outil par les nombreux flux d'information à générer.

En second lieu, les temps de transmission d'information dans notre modèle sont considérés comme étant constants, nous avons choisi une valeur moyenne, mais ceux-ci peuvent être parfois plus courts ou plus longs que cette valeur moyenne. La prise en compte de la variabilité de certains temps de transmission des informations peut certainement enrichir le modèle proposé.

Ces limitations nous amènent à proposer plusieurs développements de ces travaux.

Nous avons choisi un modèle générique de centre de décision proposé par la communauté scientifique. Or celui-ci n'a pas été conçu spécifiquement pour réaliser la simulation telle que nous l'avons présenté. Ce modèle générique peut sans doute faire l'objet de recherches afin de simplifier la modélisation du système de pilotage selon les principes que nous avons posés. L'amélioration de la maquette informatique constitue donc des perspectives d'améliorations intéressantes liées à la représentation du système de pilotage.

Par ailleurs, les temps de transfert des informations peuvent être évalués dynamiquement pour simuler des temps de transfert variables. La définition d'une valeur moyenne et d'une variance peut permettre un tirage aléatoire de ces temps de transfert pour s'approcher d'avantage de la réalité du terrain.

En conclusion de mon travail de thèse, l'opportunité de travailler sur des exemples concrets a été très enrichissante pour ce travail de recherche. Les nombreuses observations réalisées pour l'analyse du système de production de l'EIMM ont permis de définir une problématique de recherche en lien avec l'industrie. La résolution du problème scientifique a, en retour, mis en exergue les points cruciaux de la réactivité liés aux temps de réaction et notamment à la précocité du diagnostic des tâches permettant d'anticiper les réactions à réaliser.

Références bibliographiques

- [ARC 91] Archimède B., *Conception d'une architecture réactive distribuée et hiérarchisée pour le pilotage des systèmes de production*. Thèse de doctorat, Bordeaux I, 1991.
- [ARC 99] Archimède B., Coudert T., Priem L., *Ordonnancement dynamique dans les ateliers de fabrication. Une solution à base d'agents*, *Génie Industriel*, Montréal, 1999.
- [API 98] Apics dictionary, Ninth Edition, édité par Cox III J. F. et Blackstone Jr J. H., Terry College of Business, University of Georgia, 1998.
- [BAI 94] Baillet P., *Contribution à l'amélioration de la réactivité dans les systèmes de production notamment par la mise en œuvre des concepts de décentralisation des fonctions de décision*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université d'Aix-Marseille III, 1994.
- [BAP 02] Baptiste P., *Résultats de complexité et programmation par contraintes pour l'ordonnancement*, Habilitation à diriger des recherches, Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Heuddiasyc, 2002.
- [BIL 04] Billaut J.-C., Moukrim A., Sanlaville E. (eds). *Flexibilité et robustesse en ordonnancement.*, Hermès, 2004, à paraître.
- [BRA 95] Braesch C., Haurat A. *L'entreprise système, La modélisation systémique en entreprise*, C. Braesch & A. Haurat (éd.), Hermès, Paris, 1995 (ISBN : 2-86601-508-8).
- [BRO 99] Broissin N., *Contribution à l'amélioration de la réactivité des systèmes de production automatisés et flexibles grâce à un pilotage basé sur une génération de tâches décentralisée*, Thèse de Doctorat en Sciences, Université d'Aix-Marseille III, 1999.
- [CAM 00] Camalot J.P., *Aide à la décision et à la coopération en gestion du temps et des ressources*. Thèse de doctorat, LAAS, 2000.
- [CAM 95] Campagne J.P., Jacot J.H., Frein Y. et Vitry G., *A framework to specify a reactive and proactive management system*, *ETFA'95 Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation*, Paris, France, Octobre, 1995.
- [COU 00] Coudert T., *Apport des systèmes multi-agents pour la négociation en ordonnancement : application aux fonctions production et maintenance*. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2000.
- [CPL 02] Ilog Cplex 8.0, *User's manual*, France, juillet 2002.

- [DAU 92] Dauzères-Pères S., *Planification et ordonnancement de la production : une approche intégrée cohérente*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1992.
- [DAU 02] Dautreppe, Rumeau, Trentesaux, PetriParC : a Petri Net simulation tool v.1.1, rapport de projet d'ingénieur (<http://www.univ-valenciennes.fr/GRP>), ENSIAME, Valenciennes, France, 2002.
- [DAV 92] David R., Alla H., *Du Grafset aux réseaux de Petri*, Hermes, Paris, 1992.
- [DIN 98] Dindeleux R., *Propilot: une contribution à la modélisation des processus industriels*, thèse de doctorat, Université de Savoie, 1998.
- [DOU 95] Doumeingts G., Vallespir B. et Chen D., *Methodologies for designing CIM systems - A survey*, Computers in Industry, Vol. 25, No. 3, pp. ,1995.
- [ERM 96] Ermine J.-L., *Les systèmes de connaissances*, Hermès, Paris, 1996.
- [ESQ 99] Esquirol P. et Lopez P., *L'ordonnancement*, Col. Gestion, éd. Economica, 1999.
- [ESQ 01] Esquirol P., Lopez P., Huguet M.-J., Propagation de contraintes en ordonnancement, dans *Ordonnancement de la production*, coord. P. Lopez et F. Roubellat, traité IC2, Hermès Sciences Publications, Paris, 2001 (ISBN : 2-7462-0184-4), pp. 131-163.
- [FER 95] J. Ferber, *Les systèmes multi-agents – vers une intelligence collective*, InterEditions, Paris, 1995 (ISBN 2-7296-0572-X).
- [FON 97] Fontan G., Mercé C., Lasserre J.-B., Structure de décision multiniveaux en planification et ordonnancement, dans *Concept et outils pour les systèmes de production*, coord. Hennet J.-C., Cépaduès éd., Toulouse, 1997 (ISBN : 2.85428.437.2), pp 11-21.
- [HAC 00] Dictionnaire Hachette, 2000.
- [HAN 99] Hanen C., Munier A., *An approximation algorithm for scheduling dependent tasks on m processors with small communication delays*. Technical report, Laboratoire Informatique Théorique Et Programmation, Institut Blaise Pascal, University P. et M. Curie, 1999.
- [HEN 97] Hennet J.-C., *Concepts et outils pour les systèmes de production*. Automatisation & Production, Cépaduès Editions, Toulouse, 1997.
- [HER 04] Herroelen W., Roel L., Project scheduling under uncertainty survey and research potentials, EJOR, à paraître, 2004.
- [HET 96] Hétreux G., Mercé C., Fontan G., *Multi-stage, multi-product planning : a hierarchical approach using time aggregation*. Journal of Decision Systems, Vol 5, n° 1-2, pp35-50, 1996.

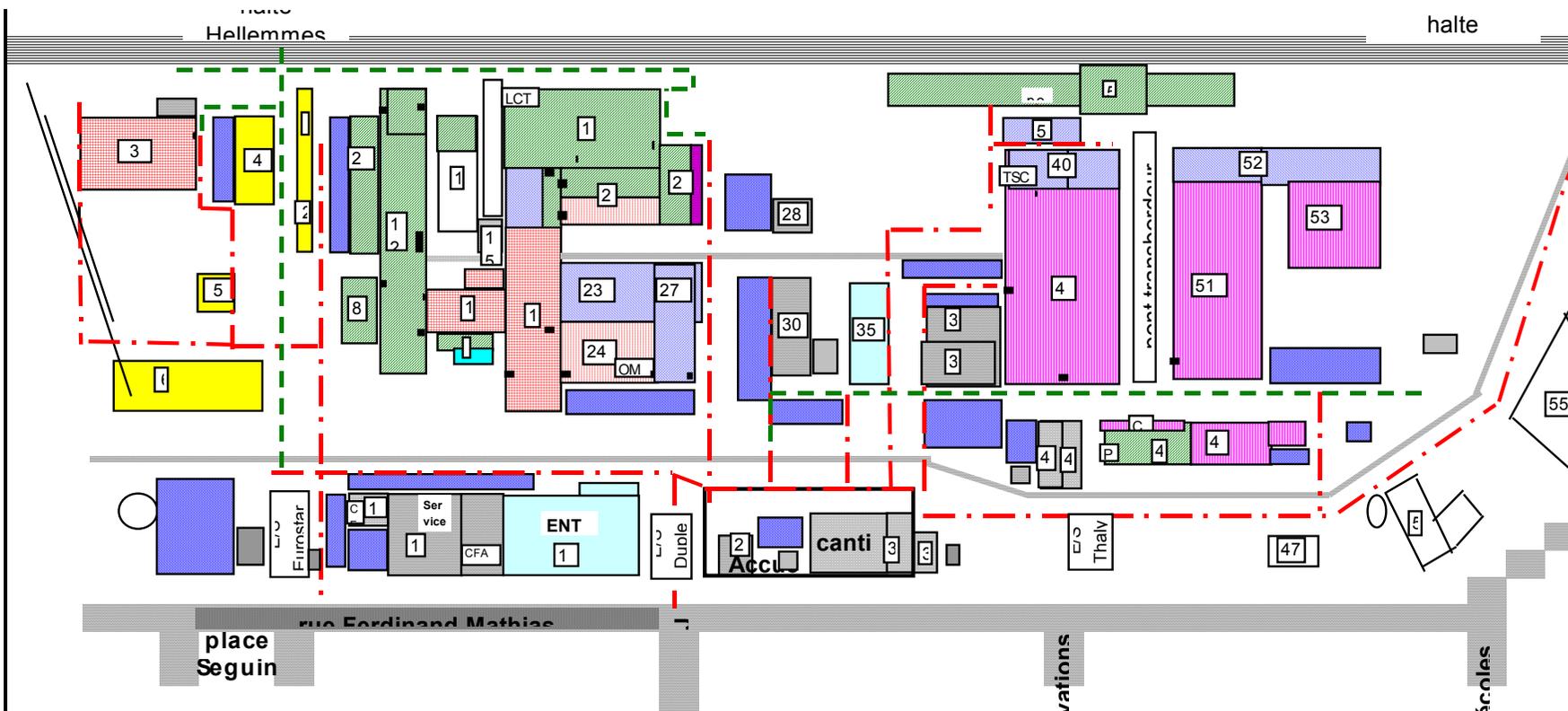
- [HUG 94] Huguet M.-J., *Approche par contraintes pour l'aide à la décision et à la coopération en gestion de production*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse, 1994.
- [HUG 96] Huguet P., *Conception de systèmes de pilotage d'atelier : modèles de référence et adaptation d'une méthodologie objet*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1996.
- [JAC 96] Jacot J.-H., Micaelli J.-P., *La question de la performance globale, chapitre I dans La performance économique en entreprise*, Hermès, Paris, 1996.
- [KOU 97] Kouvelis D., Yu G., *Robust discrete optimization and its applications*, Kluwer academic Publications, New York, 1997.
- [LAC 03] Lacomme P., Prins C., Sevaux M., *Algorithmes de graphes*, Eyrolles, Paris, 2003. (ISBN : 2-212-11385-4)
- [LEM 94] Lemoigne J.L., *La théorie du système général– théorie de la modélisation*, éd. Presses universitaires de France, 1ère éd. 1977, 4ème éd. 1994.
- [LEQ 01] Le Quéré Y., Analyse des problèmes de réactivité à l'EIMM d'Hellemmes, Rapport interne, EIMM d'Hellemmes, Novembre 2001.
- [LEQ 02a] Le Quéré Y., Identification des problèmes de planification réactive des tâches de maintenance à l'EIMM d'Hellemmes, Rapport interne, EIMM d'Hellemmes, Mars 2002.
- [LEQ 02b] Le Quéré Y., Sevaux M., Tahon C. et Trentesaux D., Résolution d'un problème industriel de maintenance des TGV à la SNCF, *4^{ième} conférence nationale de la société française de recherche opérationnelle, ROADEF' 2002*, Paris, France, 20-22 Février 2002.
- [LEQ 03a] Le Quéré Y., Sevaux M., Tahon C. et Trentesaux D., Reactive scheduling of complex system maintenance in a cooperative environment with communication times, *IEEE SMC 02-05-010*, vol 33, n° 2, pp225-235, mai 2003.
- [LEQ 03b] Le Quéré Y., Sevaux M., Tahon C. et Trentesaux D., Modèle de coopération d'un processus de ré-ordonnancement distribué, *JDA 2003*, Valenciennes, France, 25-27 Juin 2003.
- [LIU 95] Liu J., Sycara K.P., Exploiting problem structure for distributed constraint optimization, *Actes de ICMAS'95*, pp. 246-253, San Francisco, CA, 1995.
- [LOP 91] Lopez P., *Approche énergétique pour l'ordonnancement de tâches sous contraintes de temps et de ressources*. Thèse de l'université Paul Sabatier, Toulouse, 1991.
- [LOP 03] Lopez P., *Approche par contraintes des problèmes d'ordonnancement et d'affectation : structures temporelles et mécanismes de propagation*. HDR, LAAS, Toulouse, 2003.

- [MAS 99] Massotte P., Auto-organisation dans les structures et les systèmes complexes, *Conférence MOSIM'99*, Modélisation et simulation des flux physiques et informationnels, G. Habchi & A. Haurat (eds), Annecy, octobre 1999, SCS International, Gand, Belgique pp. 21-29 (ISBN 1-56555-176-1).
- [MEU 97] Meunier P., Denis B., Validation du comportement dynamique des architectures de conduite des systèmes de production par simulation, *Conférence MOSIM'97*, Rouen, 5-6 juin, France, 1997.
- [MES 80] Mesarović M.D., Macko D., Takahara Y., *Théorie des systèmes hiérarchiques à niveaux multiples*. Economica, Paris, 1980 (ISBN 2-7178-0269-X).
- [MIN 98] Mingozi A., Maniezzo V., Ricciardelli S., Bianco L., An exact algorithm for the resource constrained project scheduling problem based on a new mathematical formulation. *Management Science*, Vol. 44, n° 5, May 1998.
- [MOH 96] Möhring R.H., Schaffter M.W., Schulz, A. S., Scheduling jobs with communication delays: Using infeasible solutions for approximation. In *Algorithms - ESA '96, J. Diaz and M. Serna, Eds. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1136. Springer, Berlin, Germany, pp. 76-96,1996.
- [MON 01] Monteiro T., Ladet P., Formalisation de la coopération dans le pilotage distribué des flux interentreprises. *APII-JESA* vol 35, p885-904, 2001.
- [MOU 99] Moukrim A., Sanlaville E., Guinand F., Scheduling with Communication Delays and on-Line Disturbances, *EUROPAR'99*, LNCS 1685,pp350-357, 1999.
- [PES 98] Pesin P., Trentesaux D., Tahon C., Proposal of an event filtering approach to improve the reactive management of complex industrial systems, *JESA*, vol 32, n° 4 , 1998, pp 487-508.
- [PES 01] Pesin P., *Pilotage des systèmes complexes*, rapport technique, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2001.
- [REG 95] Regnier, P., Vallespir, B., Conduite réactive des systèmes de production : intégration des régimes périodique et événementiel. *Actes du 3^e congrès international de génie industriel. L'intégration des ressources humaines et des technologies : le défi*. Vol. 3, pp. 1965-1985, Montréal, Québec, 1995.
- [ROU 97] Roux W., *Une approche cohérente pour la planification et l'ordonnancement de systèmes de production complexes*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1997.
- [ROY 93] Roy B. et Bouyssou D., *Aide multicritère à la décision : méthode et cas*, Economica, Collection Gestion, Paris, 1993.

- [SEV 02] Sevaux M., Sørensen K., Genetic algorithm for robust schedules. *8th International Workshop on Project Management and Scheduling, PMS' 2002*, pp 330-333, Valence, Espagne, Avril, 3-5 2002.
- [SHE 89] Enterprise Wide data modelling, Springer-verlag, 1989.
- [SMI 80] Smith R. G., The Contract Net protocol : high level communication and control in a distributed problem solver, *IEEE Transactions on Computers*, Vol C-29, n° 12, pp 1104-1113, December 1980.
- [SIM 77] Simon H. A., *The new science of management decision*, Prentice-Hall, New-Jersey, USA, 1977.
- [SOL 02] Ilog Solver 5.1, *User's manual*, France, juillet 2002.
- [SOR 03] Sørensen K., *A framework for robust and flexible optimisation using metaheuristics with applications in supply chain design*, PhD Université d'Anvers, 2003.
- [TAH 01] Tahon C. et Trentesaux D., *Aide à la décision en gestion de production*, Hermès, 2001.
- [TRE 01] Trentesaux D., Campagne J.P., Erschler J., A generic design framework for decentralized control: the DMU model, *2nd IFAC/IFIP/IEEE Conf. On Management and Control of Production and Logistics, MCPL 2000*, Pergamon, vol. 3, 2001, pp. 1021-1026.
- [TRE 02] Trentesaux D., *Pilotage hétérarchique des systèmes de production*, Habilitation à diriger des recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, LAMIH-SP, 2002.
- [ZOL 98] Zolghadri M., Lecompte T., Bourrières J.-P., A generalised scheduling concept for multi-level control of complex manufacturing systems. *Actes de ASI'98*, pp 290-295, Bremen, July 14-17th, 1998.

Annexe 1

Plan de l'EIMM d'HELLEMES



■ BOUTON POUSSOIR DE RONDE

ENTREE PRINCIPALE

--- Itinéraire carrossable dans les 2 sens

- - - Itinéraire non cyclable

■ Aire de stationnement

□ Périmètre autorisé aux personnes étrangères à la SNCF

— voies principales

■ UP LCI ■ GA

■ UP OMU ■ EIS

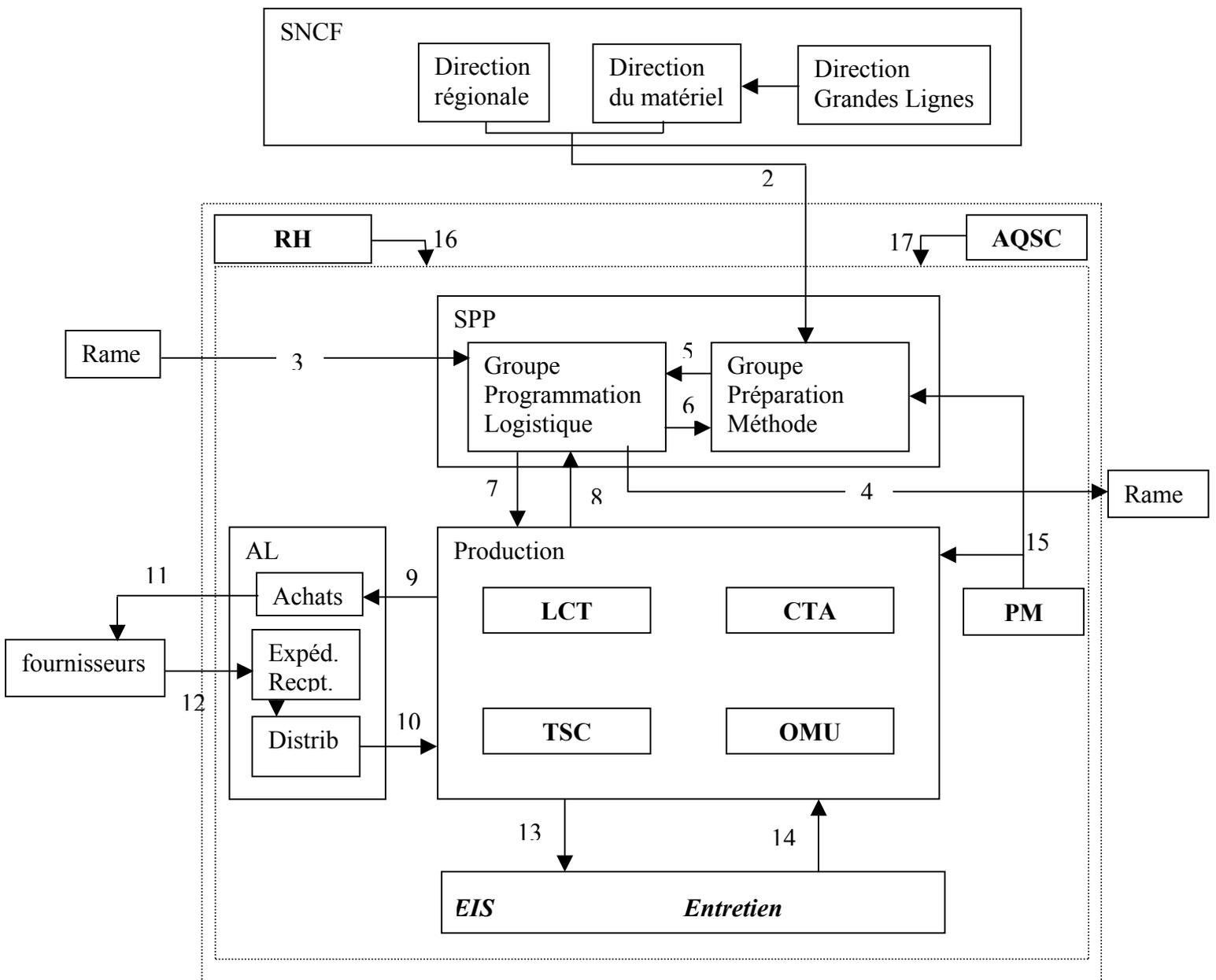
■ UP TSC

■ UP CIA

200 m

Annexe 2

Représentation simplifiée du système étudié



LEGENDE

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1. Commandes de réparation | 9. Commandes pièces |
| 2. Budget et charges de travail | 10. Livraison pièces |
| 3. et 4. Rame | 11. Commandes aux fournisseurs |
| 5. Plan de travaux | 12. Livraison fournisseurs |
| 6. Suivi des production | 13. Demande de réparation |
| 7. Rame, remorques, motrices, plans de travaux | 14. Réparation |
| 8. Rame, remorques, motrices suivi de production | 15. Règles de maintenance |
| | 16. Fonctions RH |
| | 17. Fonctions AQSC |

Annexe 3

Aide pour l'utilisation des fonctionnalités « programmation » d'Excel.

On appelle « programme » le programme mensuel ou journalier. On appelle « plan de travail » le plan type ou spécifique d'un engin dans lequel les engagements en agents pour chaque tâche sont indiqués en fonction du budget alloué. On appelle « étiquettes » les noms définis sous Excel (Menu Insertion, onglet nom puis définir) servant à répertorier les engins sur le programme, et les tâches sur les plans de travail.

Dans tous les cas, il faut avant toutes choses ouvrir le programme mensuel. Celui-ci doit contenir une ligne en haut avec des cellules au format date jj/mm/aa.

V.5 Installation des fonctions

Une macro complémentaire nommée « programmation.xla » est installée dans le répertoire [root]\Program files\microsoft office\office\macrolib\

Pour activer cette macro, il faut la sélectionner parmi les macro complémentaires d'Excel (menu outils, macro complémentaires). Ensuite, on associe une barre d'outil à cette macro. Pour cela, il suffit d'ouvrir le fichier yann.lequere8.xlb et la barre d'outil personnalisée apparaît. Attention cette manipulation efface toutes les barres d'outils personnalisées que vous avez précédemment créées.

V.6 Prise en main rapide

Principe de fonctionnement

Le principe consiste à associer des engagements aux tâches prévues sur le programme mensuel.

	24	25	26	27
	24	25	26	27
ram	24	25	26	27
mar				
mer				
jeu				
ven				
z	6137 (5)			
vtu	40	21 74 300 - 5 en 21-82 366 - 6 B11 tu78 RG3 C160 F.		
asp	Sauf	A	TOL	TOL
oh				RESERVOIR

figure 1 : programme mensuel. Les tâches associées à la VTU 40 sont J8,J9,J10... mais les tâches Asp, Souf, A, Tol... peuvent aussi être reprises dans les plans de travail.

Pour cela, on crée un plan de travail par série d’engin suivant le type d’intervention et le budget alloué. Dans chaque plan de travail, on affecte des ressources aux tâches apparaissant dans le programme mensuel.

	A	B	C	D	E
1		UT280_AI	Clim	Toliers	Peintres
2	J1				4
3	J2			1	1
4	J3		3	5	
5	J4		4		
6	J5		2		3
7	J6		1	3	
8	J7				3
9	J8				2
10	J9			2	4
11	J10			3	1
12	J11		1	1	2

figure 2 : plan de travail « Engagement VTU » associé aux VTU. A chaque J8 repéré dans la plage de cellules des VTU dont le plan de travail associé est « Engagement VTU », on ajoute 2 peintres.

Puis, on associe chaque engin à un plan de travail dans l’onglet « informations » du fichier « Informations Production » en écrivant le nom du fichier dans la colonne « Plan de travail associé ».

	A	E	F	G	H	I
1	Etiquette	UT directrice	numéro d'arrivée	numéro de sortie	Type d'intervention	Plan de travail associé
52	VTU_40	280	21 74 300 - 5	21-82 366 - 6	B11tu78 RG3 C160 F/NF 4	Engagement VTU
53	VTU_55					
54	VTU_56					
55	VTU_57					
56	VTU_58					
57	VTU_59					
58	VTU_60					

figure 3 : Onglet Information. On associe le plan de travail « Engagement VTU » à l’engin VTU_40. Ainsi devrait-on trouver 2 Peintres nécessaires le 10/06 correspondant au J8 de la VTU 40.

Ensuite, cliquez sur « calcul des engagements » dans le menu « programmation » et la fonction calcule automatiquement le cumul jour par jour des ressources utilisées. Deux messages peuvent survenir. Premièrement, cliquez sur OK et recherchez l’emplacement du fichier Plan de Travail (ex : Engagement VTU.xls) et cliquez sur Ouvrir.

2. Conception du programme mensuel

La conception d’un programme mensuel nécessite quelques précautions afin que le système marche pour l’ensemble des acteurs. Une **ligne de date** doit être placée en haut du programme au format date Excel par défaut. Les **engins** doivent être enregistrés en tant

qu'étiquette, la zone associée à l'étiquette doit couvrir l'ensemble des tâches de l'engin. Les engins non enregistrés ne seront pas pris en compte dans le calcul des engagements. Les tâches d'un engin ne faisant pas partie de la zone associée à l'étiquette ne seront pas prises en compte dans le calcul des engagements. Le nom des étiquettes ne doit pas contenir de caractères spéciaux comme la ponctuation, les espaces... dans le cas où l'étiquette n'est pas créée un message d'erreur apparaît. Les informations relatives à la nature des interventions pour les VTU et les TRD doivent respecter un certain format:

Numéro d'entrée	en	Numéro de sortie	Type de l'engin	Type d'intervention	Unité directrice
21 72 453-2	en	29 21 410-1	B11tu7 5	RG3 C160 Fr/F	25 0
24 54 321-1	en	idem	B9tu75		U T41280

Le mot « **en** » permet de séparer le numéro d'entrée du numéro de sortie. La seule information importante concerne l'unité directrice de l'engin. Celle-ci doit impérativement être placée à la fin de la phrase.

3. Conception d'un plan de travail

Un plan de travail est un fichier Excel que vous conservez sur votre poste (figure 2). Les tâches apparaissant sur le programme mensuel doivent être reprises dans la première colonne (à partir de la deuxième cellule). Les ressources ou les tâches détaillées pour lesquelles on veut calculer le cumul jour par jour des engagements sont reprises sur la première ligne (à partir de la deuxième cellule). Pour les tâches dont l'engagement dépend de l'unité directrice, on ajoute le numéro de l'unité et AI à la fin de l'intitulé de la ressource ou de la tâche détaillée (ex : UT41280AI ou Dtg Salle 280AI). Par ailleurs, il est possible de réaliser des engagements pour travaux préparatoires (ex : pour engager un expert grenailage une journée avant le grenailage en J3, on indique dans la cellule (J3, expert grenailage) : 1(-1) ce qui signifie un agent engagé un jour ouvré avant J3.

4. Conception d'une feuille Absences Agents

Pour concevoir une feuille Absences Agents, il suffit de cliquer sur le menu « Programmation » puis « créer une feuille Absence ». La fonction copie automatiquement le calendrier sur le programme mensuel dans la feuille « Absences Agents » du fichier « Informations Production ». Ecrivez le nombre total d'agents dans l'unité dans chaque cellule de la ligne correspondante. Ensuite pour chaque jour, vous pouvez entrer un nombre d'agents absents. Par la suite, ce fichier sera incorporé automatiquement dans le calcul des engagements.

VI.1 Description des boutons

1. Mise en forme

Ce bouton sert à vérifier la mise en forme du programme. La fonction vérifie l'encadrement des engins enregistrés en étiquette sur le programme. Il suffit de cliquer sur le bouton pour lancer la vérification. En cas de problèmes, les cellules dont la mise en forme n'est pas valide (encadrement manquant) sont sélectionnées.

2. Enregistrer une étiquette

Ce bouton sert à enregistrer un engin du programme en tant qu'étiquette. Il faut sélectionner n'importe quelle cellule à l'intérieure d'une plage engin encadrée et cliquer sur le bouton. La zone est repérée en suivant le cadre de l'engin et enregistrée avec le nom figurant dans la cellule la plus haute à gauche de la plage.

3. Sélection totale

Ce bouton permet de visualiser l'ensemble des étiquettes « engin » enregistrées et les zones associées aux engins. Il suffit de cliquer sur le bouton à partir de la feuille programme pour visualiser les engins enregistrés en tant qu'étiquettes.

4. Informations engins

Ce bouton crée la feuille « informations » qui permet de retrouver des informations telles que les dates d'arrivée et de sortie des engins, la durée d'immobilisation, l'unité directrice pour les aménagements intérieurs, le numéro d'entrée et le numéro de sortie de l'engin. Sur cette feuille « informations », la colonne « plan associé » permet d'affecter un plan de travail spécifique pour chaque engin si besoin. Le calcul des engagements utilise ces informations pour retrouver les plans de travaux. Si pour un engin aucun plan n'est affecté alors les engagements associés à cet engin ne seront pas pris en compte dans le calcul.

5. Calcul des engagements

Si une feuille « engagements prévisionnels » existe déjà, il vaut mieux la renommer afin de comparer les engagements initiaux aux engagements calculés après les différentes

modifications apportées aux plans de travail ou au programme. Il suffit de cliquer sur le bouton et le calcul est lancé en fonction des plans associés dans la feuille « informations ».

6. Créer un fichier « Absences Agents »

Cliquez simplement sur le menu. La fonction réplique le calendrier du programme mensuel et crée deux lignes : une ligne « Absences agents » où vous pouvez indiquer le nombre d'agents prévus absents, et une ligne « Nbre total agent » où vous indiquez le nombre d'agent total de l'unité. Dans le futur, lors du calcul des engagements on déduira du nombre total d'agent, le nombre d'absents et les agents affectés aux engins pour savoir si le nombre d'agents dans l'unité est suffisant.

7. Afficher les étiquettes / Masquer les étiquettes

Ces boutons servent à afficher ou masquer les étiquettes enregistrées sur le programme. Le nombre d'étiquettes figurant dans la liste de nom est limité, il se peut qu'une étiquette soit enregistrée mais non visible dans la liste des étiquettes. Dans ce cas se reporter à la feuille « informations » qui répertorie les engins enregistrés en tant qu'étiquettes.

VI.2 Scénario type

1. Calcul simple des engagements

Ouvrez le programme mensuel. Sur la feuille « informations », affectez vos plans de travaux aux engins répertoriés dans la colonne « plan de travail associé ». Si la feuille « informations » n'existe pas, créez là en appuyant sur le bouton « Informations » puis affectez vos plans de travaux aux engins répertoriés.

Si la feuille « engagements prévisionnels » existe, supprimez là (click souris droit lorsque le pointeur se trouve sur le nom de la feuille en bas de l'écran puis choisir supprimer). Appuyer ensuite sur le bouton « calcul des engagements »

2. Modification simple du programme

La modification du programme sans remise en cause des plans de travail ne nécessite pas un calcul complet si celui-ci a déjà été réalisé. Modifiez le programme, sélectionnez la plage

modifiée sur la feuille « engagements prévisionnels » et lancez un calcul partiel en appuyant sur le bouton « calcul de la plage sélectionnée ».

Si la feuille « engagements prévisionnels » n'existe pas, modifiez le programme et cliquez sur « calcul des engagements ».

3. Ajout d'une tâche sans autres modifications du plan de travail

Ajoutez la nouvelle tâche au programme et dans le plan de travail associé à l'engin. Les noms de la nouvelle tâche sur le programme et dans le plan de travail doivent être identiques. Enregistrez et fermez le plan de travail. Lancez un calcul des engagements en cliquant sur le bouton « calcul des engagements ».

4. Modification du plan de travail

Les modifications du plan de travail correspondent aux changements d'affectation (nombre ou unité de travail) des tâches aux ressources pour un engin spécifique ou à l'ajout de nouvelles ressources. Dans ce cas ouvrez le plan de travail associé à l'engin, modifiez ce plan et enregistrez le sous un nom spécifique. Fermez le plan de travail et affectez ce plan à l'engin dans la feuille « informations ». Lancez le calcul total des engagements.

5. Conception de nouveaux programmes

Lorsqu'un nouveau projet est confié aux ateliers d'Hellemmes, notre client (généralement GL par l'intermédiaire de la direction du Matériel) détermine une charge de travail, un délai et un ensemble d'engin à traiter. Le délai parfois court et les contraintes d'exploitation du matériel réduisent considérablement le choix tant sur les dates d'arrivée des engins que sur le nombre maximum d'engins que l'on peut traiter simultanément.

Du côté des ateliers de maintenance, de nombreuses contraintes entrent en ligne de compte. Les contraintes d'emplacement des engins dans les bâtiments ou sur les voies spécialisées. Les contraintes d'approvisionnement des pièces à remonter. Enfin, les contraintes de capacité de nos ressources et les contraintes d'encombrement des engins constituent une part importante des contraintes à gérer pour garantir la durée d'immobilisation prévue. Le nombre de contraintes étant très élevé, leur gestion est donc répartie sur les différents intervenants dans l'établissement.

La conception d'un plan de travail pour une série d'engin ne dépend donc pas uniquement du délai d'immobilisation accordé. Par ailleurs, lisser la charge sur un plan de travail ne garantit surtout pas une charge lisse lorsque plusieurs engins sont présents simultanément dans l'établissement. L'utilisation des fonctions « programmation » apportées à Excel permet

de prendre en compte la charge à tous types d'engin et de concevoir des plans de travaux en fonction des disponibilités des ressources.

VI.3 Analyse des processus de programmation

1. Les acteurs du processus de programmation

Le coordinateur de production.

Il est responsable de la coordination des unités de production et des approvisionnements. De ce fait, il gère la mise en forme du programme et les modifications demandées par les unités de production. Du point de vue de la mise en forme du programme, il doit donc vérifier que les étiquettes engins couvrent la totalité des tâches de l'engin. Du point de vue programmation, il gère les contraintes d'emplacement des engins dans les bâtiments et sur les voies spécialisées. Il planifie une charge acceptable pour chaque jour, pour chaque bâtiment ou voie spécialisée.

Les responsables production des UP.

Il est responsable de la production des Unités de Travail. Il gère la mise à disposition des rames auprès des unités de production, il surveille les approvisionnements. Il gère la charge planifiée pour chaque jour dans les bâtiments ou sur voies spécialisées. En d'autres termes, il ordonnance les engins sur les emplacements en déterminant les heures d'arrivée et de départ des engins sur les différents emplacements. D'autre part, il gère la charge globale de son unité de production. Pour cela, il s'assure chaque jour que l'ensemble des tâches confiées aux UT dont il est responsable correspond à la capacité globale de l'UP.

Les Dirigeants d'Unité de Travail.

Le Dirigeant d'Unité est responsable de la production de son unité de travail. En fonction de la charge de travail planifiée, il ordonnance les tâches sur l'ensemble des agents dont il dispose.

Le pôle approvisionnement.

Le pôle approvisionnement gère la réception des pièces à remonter. Il gère également la livraison des pièces auprès des Unités de Travail.

2. Processus de conception d'un programme

Les contraintes extérieures données par le client sont le début et le fin du projet, les contraintes de nombre maximum d'engins simultanément immobilisés, les tâches souhaitées et le budget alloué.

Au niveau de l'établissement et à chaque niveau de production en terme de conception du programme, les variables de décisions reposent sur les dates d'arrivée et de livraison de

chaque engin en fonction des disponibilités prévues (Durée Moyenne de Présence au mois) et sur la séquence et la durée des tâches choisies sur le plan de travail. Il est également possible d'agir sur la capacité des unités de production en réorganisant partiellement les Unités de Travail.

A l'heure actuelle, un plan de travail unique par type d'engin est réalisé en concertation entre GPM et les UP. La séquence et la durée des tâches (charge totale de la tâche divisée par le nombre d'agents affectés) sont figées par rapport à une durée d'immobilisation désirée par le client. Pour réduire la durée d'immobilisation, on affecte un maximum d'agents sur les tâches du chemin critique. Ensuite les dates d'arrivée et de livraison des engins sont précisées en fonction des capacités des UT (Annexe I). **L'allocation des ressources aux tâches, c'est à dire l'affectation des agents aux tâches, ne doit être figée que si la ressource est dite « goulet », dans les autres cas cette variable de décision doit être laissée à la disponibilité des DU de manière à gérer le partage des ressources sur les différents engins en vue d'une optimisation globale (Annexe II).** Or dans une situation régulière, les DU allouent les agents en fonction du plan de travail et en respectant l'ordre d'arrivée des engins même si ce n'est pas optimum vis à vis de la situation globale de l'atelier. Il est donc préférable de figer des créneaux d'intervention (Tolerie, Peinture...) en gardant un degré de liberté par rapport à l'allocation des ressources.

3. Processus de modification d'un programme

Les modifications possibles de la programmation sont liées à la nature de la tâche que l'on souhaite modifier. On doit essentiellement distinguer les tâches qui n'ont pas de liaisons avec d'autres tâches du plan du travail de celles qui doivent impérativement être réalisées dans un créneau d'intervention particulier (par exemple les tâches de démontage du plancher). Pour les tâches sans liaisons, les modifications possibles sont le changement de créneau de la tâche, le changement d'allocation de ressources ou la demande de renfort auprès d'une autre unité. Pour les tâches liées à un créneau d'intervention, les modifications possibles concernent l'allocation de ressources, la demande de renforts, la permutation avec un autre créneau d'intervention et le décalage du créneau d'intervention.

Ces modifications peuvent s'opérer au sein d'une même Unité de Travail (déplacement d'une tâche dans un autre créneau de l'Unité de Travail ou modification de l'allocation des ressources), au sein d'une même Unité de Production (demande de renforts entre UT) ou entre Unités de Production (permutation de tâches ou décalage de créneau d'intervention). D'une manière générale, on doit privilégier les modifications au plus près du terrain, c'est à dire les modifications dans l'UT, puis dans l'UP avant de procéder à des changements entre UP. En effet, plus la modification est réalisée proche du terrain plus la mise en œuvre sera rapide et simple à appliquer.

Titre : Proposition d'un modèle de pilotage pour l'ordonnancement et la planification réactive : Application à la maintenance ferroviaire.

Mots clés : Pilotage, réactivité, ordonnancement de projet, réseaux de Petri, systèmes distribués.

Résumé : Le but de ce travail est de mesurer la performance d'un système de pilotage de la production. Nous nous intéressons particulièrement à la problématique des systèmes de pilotage dans les environnements composés de plusieurs centres de décision, en prenant en compte leur temps de communication. Lorsqu'un aléa de production survient auprès d'un centre de décision, les modifications désirées par ce centre de décision peuvent avoir des conséquences sur les activités pilotées par d'autres centres de décision car il existe des contraintes entre les tâches de chacun de ces centres. La coordination entre chacun de ces centres impose des temps de réaction. Mais les modifications demandées peuvent être incompatibles avec ces temps de réaction. C'est pourquoi, nous proposons un modèle de pilotage pour l'ordonnancement et la planification réactive en intégrant les temps de réaction. Ce modèle conduit à une définition formelle de la réactivité utilisée sur l'exemple industriel de la maintenance des TGV à l'EIMM d'Hellemmes de la SNCF.

Title : Proposition of a control model for reactive scheduling and planning : Application to railway maintenance.

Keywords : Control, reactivity, project scheduling, Petri Nets, distributed systems.

Abstract : The aim of this work is to measure the performance of a production control system. We focus on the problematic of control system in an environment composed of several decision centers, taking into account reaction delays. When an unexpected event is detected by a decision center, some modifications of the schedule required by this decision center may induce consequences on tasks under the control of other decision centers, because there exist some constraints between the jobs controlled by different decision centers. Each modification during the execution of a task should be submitted to the approval of each concerned decision center. The coordination between these decision centers implies a reaction delay between all of them. But, the suggested modifications may not be compatible with these reaction delays. This is why we present a control model for reactive scheduling, including reaction delays between decision centers.
This model leads to a formal definition of reactivity being used to the industrial case of the high-speed train (TGV) maintenance at the French railway company (SNCF).
