

THÈSE

Présentée
en vue de l'obtention du grade de
docteur de

L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

École doctorale : Systèmes
Spécialité : Systèmes Industriels

par

Matthieu DUPUY

**Contributions à l'analyse des systèmes industriels
et aux problèmes d'ordonnement à machines parallèles flexibles :**
application aux laboratoires de contrôle qualité en industrie pharmaceutique

Soutenance prévue le 14 septembre 2005, devant le jury composé de :

MM.	Michel GOURGAND	Rapporteur
	Bruno VALLESPER	Rapporteur
	Jacques ERSCHLER	Président
	Éric DOUCET	Examineur
	Lionel DUPONT	Examineur (Directeur de thèse)
	Jacques LAMOTHE	Examineur (Co-directeur de thèse)

Thèse préparée au Centre de Génie Industriel de l'École des Mines d'Albi-Carmaux

*Petro esto duris
Cor amicis
Hostibus ensis
Haec tria si fueris, Petro-corensis eris*

Avant-propos : une histoire humaine...

Avant d'inviter le lecteur à se plonger dans ce mémoire de thèse, je tiens à vous rappeler quelques secondes qu'avant d'être pour l'éternité ma modeste contribution à la science, cette thèse aura d'abord été une formidable histoire humaine.

Une histoire humaine qui dure depuis près de trois décennies avec ceux qui m'ont toujours guidé et encouragé et qui ont fait que j'en suis arrivé là aujourd'hui : mes parents. Merci à vous deux du fond du cœur.

Une histoire humaine, au sein du groupe Pierre Fabre, liée à la confiance qui m'a été faite pour ce projet, ainsi que la qualité des conseils pour sa réalisation. Je pense naturellement à Messieurs Bruno Foucaud, Aimé Balssa, Jacques Farrenq, Charles Gancel, Alain Bonnafé et plus récemment Éric Doucet et Christophe Rousse, sans pour autant oublier Bernard Freiss et Nicole Pflüger. Je pense également à ceux qui m'ont accompagné dans cette aventure au quotidien et notamment Alain Moser, Stéphanie Ladaïque, Franck Dauvilliers et Philippe Bornert. Je pense aussi à toutes les autres personnes - la liste est trop longue pour pouvoir toutes les citer - que j'ai pu côtoyer au cours de ces presque quatre années, avec une dédicace spéciale à tous les membres de la Direction de la Logistique, permanents et stagiaires. Je pense enfin aux personnes de l'usine de Gien et notamment celles du laboratoire de contrôle qualité, qui me voient régulièrement depuis près de quatre ans, merci pour tout.

Une histoire humaine toujours, car elle s'est également déroulée dans un cadre qui m'accueille depuis huit ans, l'École des Mines d'Albi, où j'ai franchi plusieurs étapes de ma construction personnelle grâce à l'environnement de grande qualité et de grande valeur. Je pense notamment à Danièle Dolmière et à Hervé Pingaud qui ont été pour moi ce que le tuteur est à l'arbre, une aide pour grandir et se construire. Merci à eux ainsi qu'à l'ensemble des personnes de cette école, passées et présentes. Un grand merci également à Olivier Telle, Caroline Thierry et Gérard Bel qui ont participé à l'émergence de mon envie de faire une thèse.

Une histoire humaine encore avec mes deux encadrants, Lionel *Abdel-Kader ben* Dupont et Jacques *C3PO* Lamothe, qui m'ont suivi, encouragé à me lancer dans cette aventure, accompagné, aidé, guidé, pour arriver à ce résultat. Merci à eux deux, sans oublier la très précieuse aide de Paul Gaborit pour le travail réalisé, le support d'Isabelle Fournier ainsi que la compagnie de l'ensemble du Centre de Génie Industriel et de tous les thésards de l'École. Une pensée également à Franck D., toujours présent, même quand le Stade Français perd souvent face au Stade Toulousain. Un grand merci aussi à Franck F. pour tout ce que l'on a réalisé ensemble et Frédérick pour sa contribution pertinente à ce travail.

Une histoire humaine également dans le bout de chemin parcouru avec Matthieu Lauras, depuis notre arrivée à Albi jusqu'à aujourd'hui, où nos chemins ont légèrement divergé. Mais un fossé n'est-il pas l'occasion de bâtir un pont ? Merci à toi, Matthieu.

Une histoire humaine évidemment due à tous ceux qui ne comprennent rien (enfin pas grand chose) à ce qui est écrit dans les pages suivantes, mais qui me soutiennent et qui m'aiment simplement parce qu'ils sont mes ami(e)s. Une pensée émue pour tous les mariages et naissances qui ont eu lieu pendant que cette thèse mûrissait, notamment celui qui m'a valu la formidable expérience d'être témoin (avec tous les *petits* détails associés) et celle qui a fait de moi un heureux parrain. Merci à vous tous pour les encouragements, la relecture pour le papa de ma filleule et surtout de ne m'avoir pas demandé trop souvent : « quand finis-tu ? ».

Une histoire humaine sans doute grâce à la présence de deux personnes extraordinaires qui savent être là quand tout va bien autant que quand rien ne va plus. Élise et Marie-Céline, merci à vous deux du fond du cœur.

Une histoire humaine enfin lors de la soutenance de cette thèse, que Jacques Erschler en tant que président et que Michel Gourgand et Bruno Vallespir en tant que rapporteurs m'ont fait l'honneur d'évaluer. Merci.

Ainsi s'achève cette histoire humaine qui restera en moi pour longtemps. Maintenant, ce manuscrit peut commencer à la transformer en *kitsch*, « la station de correspondance entre l'être et l'oubli » [Milan Kundera, *L'insoutenable légèreté de l'être*].

Table des matières

1	Introduction générale	1
1.1	Le secteur pharmaceutique et ses spécificités	2
1.1.1	Les contraintes réglementaires de la production de médicaments	2
1.1.2	Le médicament, une chaîne logistique complexe	3
1.2	L'industrie pharmaceutique : un secteur en pleine mutation	3
1.2.1	Évolution de son environnement	3
1.2.2	Évolution du contrôle qualité	6
1.2.3	Pourquoi travailler sur le contrôle qualité ?	6
1.3	Notre cas d'application industriel : le groupe Pierre Fabre	6
1.4	Organisation du texte : nos axes d'études	8
1.5	Guide de lecture	9
I	Le diagnostic et le traitement des dysfonctionnements de systèmes industriels	11
2	Modélisation d'entreprise et amélioration de systèmes industriels : deux états de l'art pour un constat de carence	15
2.1	Un système socio-technique avec des dysfonctionnements majeurs	15
2.1.1	Notions de systémique : les systèmes socio-techniques	15
2.1.2	Le pilotage d'un système par la performance	16
2.2	État de l'art sur la modélisation d'entreprise	18
2.2.1	Les différents concepts de la modélisation d'entreprise	18
2.2.1.1	Les architectures de référence	18

2.2.1.2	Les cadres de modélisation	18
2.2.1.3	Panorama de méthodologies existantes	19
2.2.1.4	Panorama des modèles disponibles	24
2.2.1.4.1	Le point de vue fonctionnel	24
2.2.1.4.2	Le point de vue informationnel	24
2.2.1.4.3	Le point de vue ressource	24
2.2.1.4.4	Le point de vue organisationnel	25
2.2.2	PETRA, un guide méthodologique pour une démarche de réorganisation industrielle	25
2.3	État de l'art sur l'amélioration de systèmes industriels	27
2.3.1	Les différentes approches	27
2.3.2	Les différents supports	28
2.3.2.1	Les démarches centrées sur l'élimination du gaspillage	30
2.3.2.1.1	La Production au Plus Juste ou Lean Manufacturing	30
2.3.2.1.2	Le Kaizen ou amélioration progressive au quotidien	31
2.3.2.2	Les démarches centrées sur la réduction des défauts	32
2.3.2.2.1	Le management par la qualité totale ou TQM	32
2.3.2.2.2	Le Six Sigma : réduire la variabilité à tous les niveaux	33
2.3.2.3	Une démarche centrée sur le rendement des ressources, la Maintenance Productive ou TPM	34
2.3.2.4	Une démarche centrée sur les évolutions radicales : le Business Process Reengineering	37
2.3.2.4.1	Les principes fondamentaux du BPR	37
2.3.2.4.2	La démarche BPR	37
2.3.2.4.3	Quelques outils efficaces pour le BPR	38
2.3.3	Synthèse sur l'amélioration de systèmes industriels	38
2.3.3.1	L'implication de la direction : première condition nécessaire de succès	38
2.3.3.2	Adhésion et participation active de l'ensemble du personnel : seconde condition nécessaire de succès	39
2.3.3.3	Les instruments existants pour l'amélioration des systèmes industriels	39
2.3.3.4	Un constat de carence	41

3	Proposition d'une grille d'analyse/action instrumentée pour faire le lien entre l'étape de diagnostic et l'étape de traitement dans une méthode d'amélioration d'un système industriel	43
3.1	Présentation générale de la méthode	43
3.1.1	Phase de diagnostic	44
3.1.1.1	Étape de modélisation	44
3.1.1.2	Étape d'analyse	46
3.1.2	Phase de traitement	46
3.1.2.1	Étape de priorisation des actions	46
3.1.2.2	Étape de conduite des actions	47
3.1.3	Itération de la méthode en fonction des évolutions	47
3.2	La grille instrumentée : le lien nécessaire entre le diagnostic et le traitement	48
3.2.1	La démarche d'analyse pour l'identification des dysfonctionnements	48
3.2.2	Instrumentation de l'analyse et de la mise en œuvre des améliorations	51
3.3	Synthèse de notre apport	54
4	Exemple d'application de notre méthode sur le cas industriel étudié	55
4.1	Le diagnostic du système	56
4.1.1	Modélisation du système	57
4.1.1.1	Point de vue fonctionnel	57
4.1.1.2	Point de vue ressources	61
4.1.1.3	Point de vue organisationnel	61
4.1.1.4	Point de vue décisionnel	63
4.1.1.5	Point de vue informationnel	63
4.1.2	Analyse des modèles	65
4.1.2.1	Fonctionnel	65
4.1.2.1.1	Analyse de la valeur ajoutée par étapes du contrôle qualité	65
4.1.2.1.2	Analyse de la valeur ajoutée par type de flux	66
4.1.2.2	Ressources	67

4.1.2.3	Organisationnel	67
4.1.2.4	Décisionnel	67
4.1.2.5	Informationnel	68
4.1.2.6	Fonctionnel-Ressources	68
4.1.2.6.1	Flexibilité et réactivité des ressources des laboratoires . .	68
4.1.2.6.2	Un SMED impossible : le conditionnement des colonnes chromatographiques	70
4.1.2.6.3	Organisation des flux sur les ressources	72
4.1.2.7	Ressources-Organisationnel	72
4.1.2.8	Fonctionnel-Décisionnel	73
4.1.2.9	Ressources-Décisionnel	73
4.1.2.10	Informationnel avec les autres points de vue : les informations requises	73
4.2	Traitement du système	73
4.2.1	Fonctionnel	73
4.2.1.1	Recentrage des techniciens sur leur valeur ajoutée	73
4.2.1.2	Suppression des analyses superflues	74
4.2.1.3	Diminution des contrôles bloquants	74
4.2.1.4	Rationalisation du flux : prélèvement et identification couplés . . .	74
4.2.1.5	Les fournisseurs de composants	74
4.2.1.5.1	Suivi du nombre de lots fournisseurs par réception de commande	75
4.2.1.5.2	Analyses multiples d'un même lot fournisseur	75
4.2.1.5.3	Établir des relations de coopération avec les fournisseurs de composants	75
4.2.2	Organisationnel	75
4.2.3	Décisionnel	75
4.2.3.1	Visibilité des flux logistiques du contrôle qualité	75
4.2.3.2	Visibilité court et très court termes	76

4.2.3.3	Visibilité moyen terme : analyse prévisionnelle charge / capacité . . .	76
4.2.4	Informationnel	77
4.2.5	Ressources-Organisationnel	78
4.2.6	Informationnel avec les autres points de vue : les informations requises . . .	78
4.3	Conclusion sur le contrôle qualité : une activité de service qui doit rester autonome .	78
4.4	Conclusion sur la démarche : les instruments de l'action	79
II	Problème d'ordonnement à machines parallèles flexibles	83
5	Modélisation du problème d'ordonnement d'un laboratoire d'analyses chromatographiques	87
5.1	Formaliser la réalité industrielle pour établir son modèle en théorie de l'ordonnement	87
5.1.1	La technologie chromatographique	87
5.1.2	Présentation d'un laboratoire d'analyses chromatographiques par HPLC . . .	89
5.1.2.1	Le laboratoire est un ensemble de machines parallèles, mais différentes	89
5.1.2.2	Un test chromatographique nécessite une ressource technique secondaire	89
5.1.2.3	Un test chromatographique requiert un temps de préparation dépendant de la séquence	89
5.1.2.4	Un test chromatographique nécessite l'intervention d'opérateurs humains à certains instants	90
5.1.3	Différence entre les déterminations CPG et HPLC	90
5.1.4	La gestion des regroupements	91
5.1.5	Diversité et volumétrie des analyses chromatographiques : élément sur la taille du problème à résoudre	92
5.1.6	Synthèse du problème industriel	93
5.2	Ordonnement : théorie et pratique sur notre problème	93
5.2.1	Optimisation	94
5.2.2	Panorama des méthodes de résolution	94
5.2.3	Panorama des principes de modélisation existants	95

5.2.3.1	Problèmes à machines parallèles	95
5.2.3.2	Machines parallèles non reliées (noté R_m selon Graham)	95
5.2.3.3	Machines parallèles identiques (noté P_m selon Graham) flexibles	96
5.2.3.4	Ressources secondaires	97
5.2.4	Modélisation du problème	98
5.2.5	Méthodes retenues pour la résolution de ce problème	100
6	Résolution par heuristiques à base de règles de priorité	101
6.1	État de l'art sur l'ordonnancement à base de règles de priorité	101
6.2	Notations	102
6.3	Algorithme à base de règles de priorité	102
6.4	Règles proposées	104
6.5	Expérimentation	105
6.5.1	Jeux de données	106
6.5.2	Paramétrage des règles de tri	106
6.6	Résultats	106
6.6.1	Charge normale (70 jobs)	107
6.6.1.1	Sans contrainte de validation de fin de temps de préparation	107
6.6.1.2	Avec contrainte de validation de fin de temps de préparation	108
6.6.2	Charge forte (140 jobs)	110
6.6.2.1	Sans contrainte de validation de fin de temps de préparation	110
6.6.2.2	Avec contrainte de validation de fin de temps de préparation	110
6.6.3	Analyse des résultats	110
6.6.3.1	Critères	114
6.6.3.2	Choix de la politique	116
6.6.3.3	Impact des paramètres de l'atelier	116
6.7	Conclusions	117

7	Résolution par méta-heuristique : recuit simulé	121
7.1	États de l'art	121
7.1.1	Méta-heuristiques	121
7.1.2	Recuit simulé	122
7.1.3	Structure de voisinage	123
7.2	Notre proposition de voisinages	125
7.2.1	Caractérisation d'une solution	125
7.2.2	Mécanismes de génération de voisins	125
7.2.2.1	Paramètres structurels	127
7.2.2.2	Paramètres de génération	127
7.2.3	Structures complexes de voisinages	128
7.3	Expérimentation	129
7.3.1	Génération des jeux de données	129
7.3.2	Réglage des paramètres de l'algorithme de recuit simulé	129
7.4	Résultats	130
7.4.1	Charge moyenne (70 jobs)	130
7.4.1.1	Sans contrainte de validation de fin de temps de préparation	130
7.4.1.2	Avec contrainte de validation de fin de temps de préparation	133
7.4.2	Charge forte (140 jobs)	133
7.4.2.1	Sans contrainte de validation de fin de temps de préparation	133
7.4.2.2	Avec contrainte de validation de fin de temps de préparation	138
7.4.3	Conclusions	138
8	Conclusion générale	143
8.1	Bilan des apports scientifiques	143
8.2	Bilan concernant la problématique industrielle	144
8.3	Perspectives	144
	Bibliographie	147

Chapitre 1

Introduction générale

En raison de l'ouverture des marchés et de la concurrence accrue, plusieurs phénomènes concourants ont lieu.

Tout d'abord, le phénomène le plus notable concerne l'attente des clients de plus en plus forte, non seulement en ce qui concerne le prix et la qualité, mais également sur l'innovation des produits ainsi que sur leur disponibilité. Le temps de développement et d'accès au marché devient donc une priorité des entreprises, quel que soit leur secteur.

Nous assistons également depuis plusieurs années - voire décennies pour les secteurs les plus avancés - à un recentrage de l'activité des entreprises sur leur cœur de métier. Ce cas de figure est particulièrement flagrant dans les secteurs automobile et électronique avec le recours à des acteurs fournissant des sous-ensembles complets. La raison de ce mouvement est principalement liée à la pression concurrentielle qui diminue les marges : les ressources engagées dans la production doivent l'être de façon plus efficace. Un corrolaire est une externalisation accrue des activités qui ne sont pas considérées comme faisant partie du cœur métier de l'entreprise.

Parallèlement à ces mouvements, nous pouvons aussi noter d'autres phénomènes comme la personnalisation des produits à grande échelle (mass-customization), la mondialisation des marchés (clients et fournisseurs) et les délocalisations qui peuvent avoir pour but, soit de réduire les coûts de production, soit de se rapprocher des marchés ciblés.

Face à tous ces phénomènes, le concept de chaîne logistique permet de repositionner une entreprise par rapport à ses clients finaux. Une chaîne logistique est (H. Lee et C. Billington, 1993) « un réseau d'installations qui assure les fonctions d'approvisionnement en matières premières, de transformation de ces matières premières en composants puis en produits finis, et de distribution des produits finis vers les clients ». De nombreuses autres définitions existent. Le lecteur souhaitant une vision plus approfondie consultera l'étude de J. Mahmoudi et al. (2005).

De nombreux dirigeants de grandes entreprises considèrent d'ores et déjà leurs chaînes logistiques comme une ressource stratégique, mais pour de nombreuses sociétés, elles restent un obstacle considérable. C'est en ces termes que S. Cohen et J. Roussel (2004) présentent l'une des préoccupations majeures des dirigeants d'entreprises depuis plusieurs années : la gestion de la chaîne logistique ou supply-chain management.

La gestion de la chaîne logistique est considérée par ces dirigeants comme une des réponses à cette nouvelle donne, afin d'optimiser simultanément la satisfaction de leurs clients et la rentabilité nécessaire de leur activité.

1.1 Le secteur pharmaceutique et ses spécificités

Le secteur pharmaceutique a été pendant longtemps moins contraint économiquement que les autres secteurs industriels du fait de marges plus importantes. En France, il présente les particularités, d'une part de la distinction entre le consommateur (le patient) et le payeur (à 86 % la Sécurité Sociale et les mutuelles) et d'autre part, du fait que le prix est fixé par un organisme d'état. Pour les autres pays, la situation est légèrement différente (par exemple : prix libres en Allemagne), mais cela ne changera pas fondamentalement le constat qui va être fait.

En 2003, le secteur pharmaceutique en France représente un chiffre d'affaires hors taxes de plus de 35 milliards d'euro (près du tiers du secteur automobile) et emploie environ 100 000 personnes. La France est le troisième exportateur mondial de médicaments du fait de sa position de plate-forme de production pour l'Europe. En effet, les plus importants laboratoires pharmaceutiques mondiaux produisent en France. La production représente le tiers des effectifs du secteur, répartis sur 220 sites (LEEM, 2005).

1.1.1 Les contraintes réglementaires de la production de médicaments

Comme ses produits sont destinés à avoir une action sur l'organisme humain, le secteur pharmaceutique est soumis à une organisation de la qualité extrêmement rigoureuse et dirigiste. En France, ce contexte s'exprime par les Bonnes Pratiques de Fabrication (BPF), de Distribution (BPD) et de Laboratoire (BPL), ensemble de règles ayant force de loi dont l'application est contrôlée par l'AFSSAPS (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé). En outre, pour qu'un médicament puisse être commercialisé, il doit recevoir une Autorisation de Mise sur le Marché (AMM). Ce dossier détaille l'effet du principe actif, précise les procédés de production et de contrôle, le site de fabrication... Ainsi, afin d'avoir une traçabilité des produits, un des impératifs des industries pharmaceutiques est de produire en lots de taille fixe, excluant de fait toute production continue *stricto sensu*. Ainsi, si la demande est de 1 000 et la taille de lot pharmaceutique est de 100, alors la production sera découpée en 10 lots avec chacun ses étapes de production, ses dossiers de lots, ses contrôles... Cette taille de lot pharmaceutique est un paramètre fixé dans le dossier d'AMM avant la mise sur le marché, modifiable après l'approbation d'un dossier de variation, opération longue et coûteuse, donc rarement réalisée.

De plus, ces mêmes BPF imposent l'existence des laboratoires de contrôle qualité au sein des sites de production de médicaments. Ceux-ci ont pour rôle de vérifier pour chaque lot pharmaceutique : la conformité des composants avant leur mise en œuvre ; le médicament à la fin du processus afin de déclarer produit et processus conformes (libération pharmaceutique) avant la distribution sur le marché : « Le contrôle de la qualité concerne l'échantillonnage, l'établissement de spécifications et l'analyse, ainsi que l'organisation, l'établissement des documents et les procédures de libération qui garantissent que les essais nécessaires et appropriés ont bien été effectués, que les matières premières

et les articles de conditionnement ne sont pas libérés pour la fabrication, ni les produits finis libérés en vue de leur vente ou de leur distribution, avant que leur qualité n'ait été jugée satisfaisante ».

Nous pouvons donc noter que les BPF exigent deux points particuliers :

- une production de médicaments par lots de taille fixe (déclarée dans l'AMM) ;
- un contrôle qualité réalisé de façon exhaustive sur tous les lots de composants entrant dans la fabrication d'un médicament et sur tous les lots de médicaments produits.

Ainsi, l'activité de contrôle qualité est omniprésente tout au long de la production de médicaments.

1.1.2 Le médicament, une chaîne logistique complexe

Un des impératifs du secteur pharmaceutique est la garantie de la continuité des traitements pour le patient. En termes logistiques, cela se traduit par une absence de ruptures de la chaîne logistique, du laboratoire pharmaceutique à l'officine ou à l'hôpital, donc au consommateur final. L'importance de ces ruptures est mise en évidence par la présence d'un état des ruptures de médicaments en consultation libre sur le site internet de l'AFSSAPS.

Pour ce faire, en France, le réapprovisionnement des officines doit être assuré rapidement par des grossistes-répartiteurs (figure 1.1) qui eux-mêmes doivent pouvoir être réapprovisionnés quotidiennement par les laboratoires pharmaceutiques.

Les grossistes-répartiteurs sont soumis aux obligations suivantes :

- référencer au moins les deux tiers des présentations¹ des médicaments exploitées en France auxquelles s'ajoutent les accessoires médicaux ;
- avoir un stock permettant de satisfaire au moins deux semaines de consommation ;
- livrer tout médicament du stock dans les 24 heures suivant la réception de la commande.

Pour mettre ses produits à disposition de ses clients, une entreprise organise sa chaîne logistique en fonction des contraintes inhérentes aux couples produits/marchés. Comme nous pouvons le voir sur la figure 1.2, le processus de distribution étant beaucoup plus rapide que le processus de production (temps de cycle industriel compris entre 1 et 2 ans, de la culture de la plante au centre de distribution), il est obligatoire d'avoir une production sur stock. Une production tirée par le marché en juste-à-temps est donc exclue. La production est déclenchée en amont du besoin réel par une prévision ou par une commande, elle-même basée sur une prévision de sortie locale d'un stock aval (filiale ou distributeur).

1.2 L'industrie pharmaceutique : un secteur en pleine mutation

1.2.1 Évolution de son environnement

Nous allons maintenant voir que le secteur pharmaceutique évolue sous l'effet combiné de la mondialisation de l'économie d'une part et de la diminution de la rentabilité du secteur d'autre part.

¹Présentation : les présentations d'un médicament correspondent aux différents produits finis obtenus à partir d'un même produit semi-fini. Ainsi, ce n'est pas la formule qui change, mais les conditionnements (contenance, variantes linguistiques...).

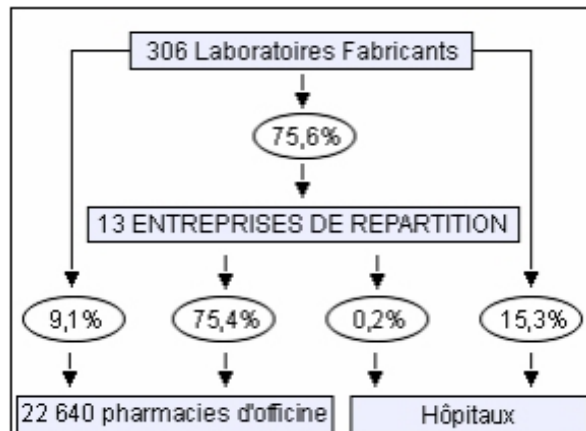


FIG. 1.1 – Le circuit de distribution du médicament en France (volumétries correspondant aux chiffres d'affaires).

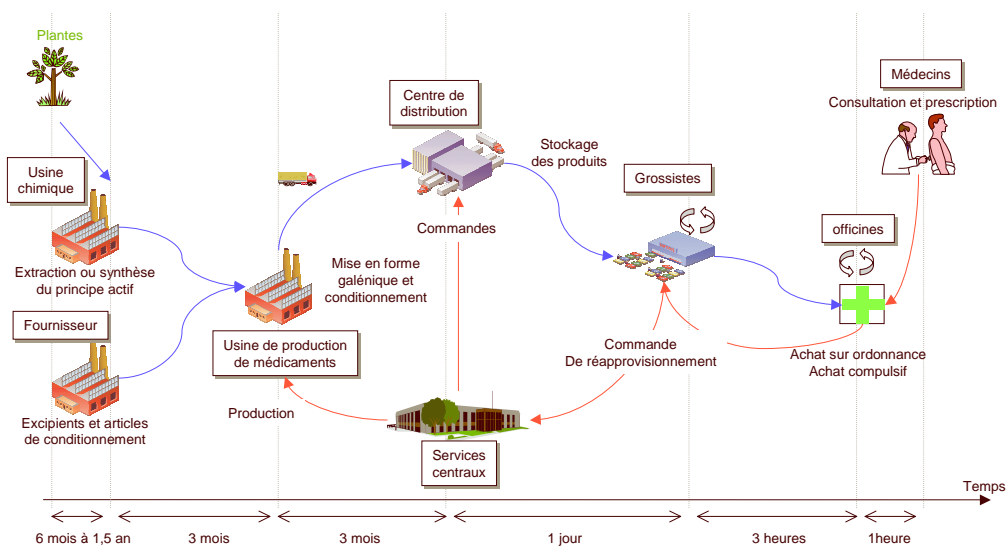


FIG. 1.2 – Schéma de principe de la chaîne logistique du médicament.

Il s'agit historiquement d'un secteur relativement peu concentré, mais la tendance est clairement à la concentration. Pour les entreprises présentes en France, la figure 1.3 nous montre qu'il s'agit encore d'un secteur réparti entre de nombreuses entreprises, bien que le nombre de laboratoires pharmaceutiques présents en France soit passé d'un millier dans les années 1970 à trois cents aujourd'hui. Ceci est médiatisé par les importantes fusions du secteur, comme Pfizer qui a racheté Pharmacia en 2003 ou plus récemment Sanofi qui a racheté Aventis pour donner naissance au n° 1 européen et n° 3 mondial, d'origine française. La dernière absorption en date a eu lieu en début d'année 2005, avec le rachat de Fournier Pharma par Solvay, groupe belge de chimie et pharmacie.

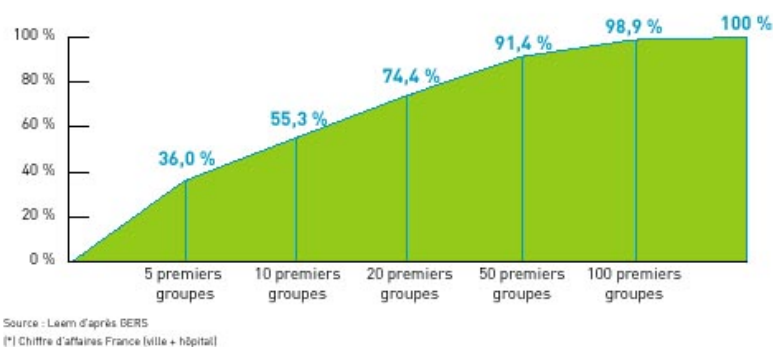


Fig. 1.3 – Répartition du marché du médicament du nombre d'entreprise par chiffre d'affaires en France.

Si nous regardons maintenant l'aspect produit, le nombre de présentations est passé de 25 000 dans les années 1930 à 20 000 dans les années 1960. Il est aujourd'hui de l'ordre de 8 500 pour 4 700 médicaments. Nous assistons donc à un important mouvement de réduction de la diversité du marché. De plus, les 500 premiers médicaments représentaient, en 2003, 80 % du chiffre d'affaires en officine et 95 % du chiffre d'affaires à l'hôpital. En corrolaire, 20 % du chiffre d'affaires en officine et 5 % du chiffre d'affaires à l'hôpital sont donc réalisés par les 4 200 médicaments restants. Malgré l'important mouvement de concentration, beaucoup de médicaments ont des ventes faibles, voire marginales. Une des fortes caractéristiques de ce secteur est la présence de petites séries de production. Une petite série de production pharmaceutique est définie par A. Ricart (2000) comme étant une vente annuelle inférieure à 10 000 unités (une unité équivaut à l'entité achetée en officine, exemple : une boîte de vingt comprimés). Une série importante correspondra à une vente supérieure à 100 000 unités par an.

Au-delà de ces mutations importantes, le besoin de mettre sur le marché de nouveaux produits, alors que les coûts de développement sont de plus en plus élevés, a obligé les entreprises pharmaceutiques à optimiser leur gestion. Pour donner un ordre d'idée, le développement d'un médicament représente un investissement de 800 millions d'euro sur une dizaine d'années ; un médicament étant commercialisé pour un ordre de grandeur de 10 000 molécules testées (LEEM, 2005).

Dans ce contexte, les processus de fabrication des produits, jusque là essentiellement focalisés sur le respect des BPF, ont dû, en plus, prendre en compte des critères économiques rigoureux de plus en plus pressants. Les sites de production ont été spécialisés par forme galénique (liquide, pâteux, formes sèches, injectables...) et ont progressivement acquis une dimension internationale (cf. tableau 1.1). L'affectation des demandes clients aux usines localisées sur les divers continents a été optimisée. Les conditions d'exploitation des sites ont elles aussi fait l'objet d'une modernisation, grâce à la mise en œuvre de logiciels modernes de gestion de production, généralement modules de solutions intégrées

(ERP). Les unités de production ont ainsi diminué de façon significative leurs coûts de revient, réduit leurs stocks et amélioré leur productivité. Pour obtenir la qualité de service légalement imposée avec des coûts maîtrisés, la logistique est devenue une activité centrale de l'entreprise.

La concurrence s'est également accrue de par la diversité des médicaments présents sur le marché, mais aussi avec le développement des génériques² qui obligent à réduire de façon drastique les prix de vente d'un médicament une fois la protection de celui-ci arrivée à expiration.

1.2.2 Évolution du contrôle qualité

Dans le cas d'un site de production pharmaceutique où un faible nombre de formules est produit, la gestion industrielle est simplifiée par l'utilisation de moyens de production dédiés à chaque formule. Dans ces conditions, le laboratoire de contrôle qualité peut également être organisé par moyens dédiés. Cependant, certains sites de production pharmaceutique sont soumis à des contraintes différentes en raison du nombre important de formules nécessitant les mêmes moyens de production. Dans ce cas, le laboratoire de contrôle qualité reçoit cette diversité de produits à analyser.

La tendance du marché est d'avoir de plus en plus d'assurance de qualité. Ceci se traduit directement par l'augmentation du nombre et de la précision des contrôles. D'ailleurs les BPF imposent de mettre en place les tests les plus précis possibles à la date de dépôt d'une AMM (ainsi, un test qui est réalisé sur un médicament par une technologie de chromatographie sur couche mince va être réalisé sur un médicament nouvellement enregistré par une technologie de chromatographie sur colonne).

1.2.3 Pourquoi travailler sur le contrôle qualité ?

Une partie du temps de cycle de production d'un médicament provient donc de l'existence du contrôle qualité sur les composants, les produits intermédiaires et les produits finis. En moyenne, le contrôle qualité correspond à environ 30 % (PEA, 2001a) du temps de cycle de production du médicament (mise en forme galénique³ et conditionnement). Finalement, l'interface entre l'aspect logistique (préoccupation nouvelle) et l'aspect qualité (préoccupation traditionnelle) va se situer - du point de vue industriel - au niveau du laboratoire de contrôle qualité. Du fait de la conjonction de plusieurs facteurs (réduction des délais, maîtrise des coûts, accroissement de la technicité et de la diversité des contrôles), le laboratoire de contrôle qualité d'une usine de production de médicament sera notre centre d'intérêt tout au long de cette thèse.

1.3 Notre cas d'application industriel : le groupe Pierre Fabre

Le groupe Pierre Fabre est le deuxième laboratoire pharmaceutique français indépendant. Ce groupe emploie 9 300 personnes dans le monde pour un chiffre d'affaires de 1,47 milliards d'euro en 2004.

²Médicament générique : lorsqu'un laboratoire découvre un médicament, il garde l'exclusivité de sa commercialisation jusqu'à l'expiration du brevet. Une copie du produit original peut alors être développée et commercialisée par un autre laboratoire. On l'appelle le médicament « générique ».

³Mise en forme galénique : ensemble des opérations de production permettant de passer des composants séparés à la forme du médicament tel qu'il sera disponible pour le patient.

Le tissu économique français du médicament est composé d'un leader mondial (Sanofi-Aventis, 25 milliards d'euro de chiffre d'affaires, plus de 100 000 employés) et d'un ensemble d'entreprises à capitaux français, d'origine familiale et issus de l'officine (contrairement à la pharmacie allemande issue d'entreprises chimiques). Le groupe Pierre Fabre se situe dans cette catégorie, aux côtés des laboratoires Servier, Ipsen, Boiron, etc.

Le groupe a été fondé en 1961 par Monsieur Pierre Fabre, pharmacien d'officine à Castres. Sa stratégie est axée sur l'officine pharmaceutique. C'est ainsi que le groupe Pierre Fabre comprend des activités pharmaceutiques (allopathie, homéopathie, phytothérapie, nutrithérapie, aromathérapie, dispositifs médicaux), mais aussi des activités dermo-cosmétiques (produits de soin (acné, mycoses, herpès...) et de beauté (shampooings, produits anti-vieillessement, maquillage, produits de rasage, amincissants, produits solaires...) pour la peau et les cheveux) commercialisées exclusivement en pharmacies et parapharmacies, pour ce qui est de la France. Cette activité dermo-cosmétique est connue du grand public au travers des marques telles qu'Avène, Klorane, Galénic, René Furterer, A-Derma, Ducray et Pierre Fabre Dermatologie.

Son activité se décompose selon ses différentes branches :

- Médicament (éthiques⁴) et Santé (OTC⁵) (50 % du chiffre d'affaires 2004) ;
- Dermo-cosmétique (42 % du chiffre d'affaires 2004) ;
- Homéopathie (7 % du chiffre d'affaires 2004).

En 2005, la branche homéopathie du groupe, le laboratoire Dolisos (n° 2 mondial du secteur), fusionne avec le laboratoire Boiron (n° 1 mondial du secteur), le groupe Pierre Fabre étant l'un des actionnaires importants de la nouvelle entité.

Le groupe Pierre Fabre est non seulement présent en France (57 % du chiffre d'affaires total du groupe en 2004), mais aussi à l'international dans plus de 130 pays (le chiffre d'affaires de la branche Dermo-Cosmétique est majoritairement réalisé à l'international : 54 % en 2004).

En 1999, la Direction Générale a engagé une démarche globale sur la logistique du groupe et de ses différentes branches. L'évaluation de la chaîne logistique, menée au premier semestre 2001 de la branche Médicament (PEA, 2001b), a montré que l'immobilisation des matières et produits due aux opérations de contrôle qualité représentait une part importante du coût global des stocks. De plus, la variabilité des délais de contrôle constituait un obstacle à une planification fine de la production et des livraisons de produits.

Il s'est par ailleurs avéré que la gestion des ateliers de contrôle n'était pas prise en compte par les différents ERP du marché (notamment le principal d'entre eux, SAP R/3). Les outils spécifiques existants couvrent essentiellement le recueil des résultats et la constitution des dossiers d'analyses, soit des besoins transactionnels pour le suivi qualité. Les aspects de pilotage de l'activité recherchés ici ne sont pas couverts.

Dans le cas du groupe Pierre Fabre, les six sites de production de médicaments sont spécialisés, comme le montre le tableau 1.1.

Ces sites de production sont situés en France et ont pour vocation d'alimenter, chacun, l'ensemble du marché mondial. Les deux centres de distribution du groupe sont spécialisés, selon que le produit est

⁴Médicament éthique : médicament vendu sur prescription médicale.

⁵Médicament OTC : médicament vendu librement sans prescription médicale (Over The Counter).

TAB. 1.1 – Spécialisation des sites de production de médicaments du groupe Pierre Fabre.

Usine	Forme galénique
Aignan (32)	Pastilles, sucres cuits, gommés
Château-Renard (45)	Dentifrices, vernis
Gien (45)	Formes sèches (comprimés, gélules, patches), Formes liquides (sirops, ampoules, aérosols), Formes pâteuses (crèmes, gels)
Pau (64)	Injectables
Cahors (46)	Phytothérapie, nutrithérapie, aromathérapie
Montrichard (41)	Homéopathie

éthique pour Ussel (19) ou OTC pour Muret (31). La production de nombreux principes actifs utilisés dans les sites de production est faite par le pôle chimique du groupe, composé des usines de Gaillac (81), Palézieux (Suisse) et Buenos Aires (Argentine).

Cette première étape de réorganisation du réseau logistique a permis de gagner en réactivité vis-à-vis du marché, donc sur les niveaux de stocks nécessaires. Pour progresser encore dans cette direction, une des étapes suivantes consiste à descendre au niveau des opérations de production et à diminuer leur temps de cycle, ainsi que leur temps de reconfiguration. Ceci permettra également de diminuer leurs coûts. D'autres voies sont également étudiées au sein de l'entreprise, comme une meilleure connaissance des besoins (prévisions et commandes), une gestion améliorée des secteurs de fabrication et de conditionnement, etc.

Le site pilote du projet est l'usine de production pharmaceutique située à Gien (45). Ce site de production fait partie des plus importants sites de production français avec plus de 110 millions d'unités sorties en 2004 et un effectif voisin de 500 personnes. Ce site est cohérent avec la description du secteur pharmaceutique faite ci-dessus. En effet, 150 formules sont produites sur ce site à partir de 500 matières premières différentes. C'est un exemple de production pharmaceutique avec quelques grandes familles (17 millions d'unités d'Eludril, 14 millions d'unités de Tardyféron, 5 millions d'unités de Cyclo3...), mais aussi de nombreuses familles avec une production de petites séries.

La problématique de gestion des laboratoires de contrôle qualité n'est pas spécifique à la production pharmaceutique, mais se retrouve également en production cosmétique ou en production chimique de principes actifs pharmaceutiques. Nous n'aborderons pas ces cas industriels connexes dans cette thèse, mais une grande partie des résultats sera probablement généralisable à ces contextes.

1.4 Organisation du texte : nos axes d'études

Dans une première partie, nous proposerons une méthodologie pour appréhender un système industriel avec des indicateurs de performance permettant de qualifier l'état de santé du système, puis d'améliorer ses points faibles. Nous commencerons par faire un état de l'art des instruments disponibles pour l'amélioration des systèmes industriels, ainsi que sur la modélisation d'entreprise (Chapitre 2). Ensuite, nous proposerons une méthodologie qui établira un lien entre les deux thématiques précédentes (Chapitre 3) et nous instrumenterons ce lien. Enfin, nous terminerons cette première partie par la mise

en œuvre de cette méthodologie sur notre cas d'application industriel (Chapitre 4) afin d'identifier les actions à mener, la cible à atteindre et les instruments nécessaires pour passer d'un état à l'autre.

Dans une deuxième partie, nous étudierons un problème d'ordonnancement mis en lumière à l'issue de la première partie. Il s'agit d'un problème d'ordonnancement pour un atelier à machines parallèles flexibles, soumis à un certain nombre de contraintes de disponibilité de ressources techniques et d'opérateurs humains. Cette modélisation sera faite en partant de la problématique industrielle (Chapitre 5). Nous proposerons alors plusieurs approches de résolution. En premier lieu, nous proposerons une approche par heuristique gloutonne (Chapitre 6), où nous généraliserons un algorithme développé pour les machines parallèles. En second lieu, nous présenterons une approche par méta-heuristique (Chapitre 7) pour laquelle nous avons retenu un algorithme de recuit simulé. Nous montrerons alors la pertinence d'une bonne définition du système de voisinage utilisé, en regard du réglage fin des paramètres du recuit simulé.

1.5 Guide de lecture

Pour le lecteur novice dans le domaine, ou souhaitant une vision globale des apports de cette thèse, nous proposons un plan de lecture linéaire.

Cependant, pour le lecteur averti ou ne souhaitant aborder que certains aspects, un plan de lecture thématique pourra être retenu, comme présenté sur le tableau 1.2.

TAB. 1.2 – Organisation du texte.

	Partie I	Partie II
Synthèse bibliographique	La modélisation d'entreprise et les démarches d'amélioration de systèmes industriels (chapitre 2)	L'ordonnancement d'ateliers à machines parallèles (chapitre 5)
Apports	Une méthode pour le diagnostic et le traitement de systèmes industriels (chapitre 3)	Ordonnancement d'un atelier à machines parallèles par heuristiques et métaheuristiques (chapitres 6 et 7)
Application	Analyse et amélioration des niveaux de performance d'un système industriel de contrôle qualité d'une usine pharmaceutique (chapitre 4)	Ordonnancement des tâches chromatographiques d'un laboratoire de contrôle qualité d'une usine pharmaceutique (chapitres 6 et 7)

Bonne lecture.

Première partie

Le diagnostic et le traitement des dysfonctionnements de systèmes industriels

Introduction de la partie

Dans cette partie, nous proposons de connecter deux courants de pensée (chapitre 2). D'une part, nous allons considérer la modélisation d'entreprise comme un support au diagnostic. D'autre part, nous allons considérer les instruments destinés à l'amélioration de systèmes industriels comme un support au traitement. Enfin, nous proposons une grille d'analyse (chapitre 3) basée sur la modélisation d'entreprise et permettant de mettre en évidence les dysfonctionnements du système industriel et les instruments d'amélioration à mettre en œuvre. Nous terminerons cette partie par une application à notre contexte industriel (chapitre 4).

Chapitre 2

Modélisation d'entreprise et amélioration de systèmes industriels : deux états de l'art pour un constat de carence

Aujourd'hui, nous faisons le constat que deux grands courants de pensée s'intéressent à l'entreprise en ce qui concerne son amélioration. Le premier est issu de la recherche et se retrouve sous le vocable de *modélisation d'entreprise*. De nombreux travaux de ce courant ont trait à l'amélioration d'entreprise et des méthodes utilisées industriellement en dérivent. Le second courant est plutôt issu de la pratique industrielle et est généralement dénommé *amélioration continue*. Il s'appuie sur de nombreuses mises en pratique industrielles et a été formalisé en plusieurs méthodes. Ces deux courants doivent-ils être opposés ? Sont-ils complémentaires ? Comment ? Voici les questions que nous abordons ici.

Pour ce faire, nous allons donc exposer dans ce chapitre les bases de ces deux courants de pensée. La problématique se pose pour l'ensemble des systèmes socio-techniques. Ainsi, même si nous présentons la problématique dans ce cadre là, les propositions de cette partie de la thèse ne valent que dans le cas des systèmes industriels de production de biens et de service.

2.1 Un système socio-technique avec des dysfonctionnements majeurs

2.1.1 Notions de systémique : les systèmes socio-techniques

J. de Rosnay (1977) a défini un système comme : « un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisés en fonction d'un but ». Quatre catégories de systèmes sont généralement admises : physiques, vivants, sociaux et techniques. Une entreprise est classiquement considérée comme un système socio-technique ayant pour but de survivre, en gagnant de l'argent.

Une entreprise peut être soit un système manufacturier (sa valeur ajoutée se traduit par des biens matériels), soit un système de service (sa valeur ajoutée se traduit par des biens immatériels appelés aussi services), soit un mélange des deux. Son but est de générer des bénéfices, lui permettant au moins de vivre, au mieux de se développer.

Selon l'approche systémique, une entreprise est un système dynamique composé de trois sous-systèmes fondamentaux (J.-L. Le Moigne, 1973) :

- le système opérant chargé de la réalisation physique grâce à des ressources (hommes, machines) ;
- le système d'information chargé de gérer les données et de permettre la capitalisation des connaissances ;
- le système de pilotage chargé de prendre les décisions pour réaliser ses objectifs.

Les systèmes socio-techniques ne se limitent pas aux entreprises, mais comprennent également les systèmes administratifs (par exemple : préfecture, ministère, mairie...) et pseudo-administratifs (par exemple : école, hôpital, armée, sécurité sociale...) qui sont également composés des systèmes opérants, de pilotage et d'information. Seul le but évolue, puisque leur survie n'est pas directement et uniquement conditionnée par un objectif de rentabilité économique.

Ces systèmes - entreprise, administration et pseudo-administration - peuvent être regroupés sous le vocable de systèmes socio-techniques. Les systèmes socio-techniques comprennent également des entités qui n'entrent pas dans le cadre précédent comme les O.N.G. (Organisations Non-Gouvernementales, par exemple : Croix-Rouge, Greenpeace, Médecins Sans Frontières...) ou les associations sans but lucratif (par exemple : club sportif, réseau d'anciens élèves, collecte de fonds pour la lutte contre une maladie...).

Nous allons proposer un panorama sur différents points touchant à l'analyse et au traitement de systèmes socio-techniques présentant des dysfonctionnements. Nous parlerons donc en premier lieu de la notion d'indicateur de performance, permettant de quantifier dans quelle mesure un système ne remplit pas son rôle. Ensuite, nous aborderons la modélisation d'entreprise et les méthodes associées pour améliorer les systèmes socio-techniques. Enfin, nous présenterons les instruments existants permettant d'améliorer les systèmes socio-techniques.

2.1.2 Le pilotage d'un système par la performance

Plusieurs courants de pensée se sont succédés au cours du vingtième siècle pour tenter de mettre en œuvre un réel pilotage par la performance. D. Brown et A. Sloan, dans les années 1920, créent plusieurs outils de contrôle financier inconnus jusqu'alors : le contrôle de gestion. Il s'agissait, pour ces deux dirigeants de la Du Pont Company, de permettre un management décentralisé et délégué de façon à améliorer les résultats. Des outils tels que des « reporting » prévisionnels et historiques, des trésoreries centralisées ou des suivis réguliers des niveaux de stocks sont développés pour soutenir cette approche.

Vers la fin de la seconde guerre mondiale, un courant important voit le jour avec le développement d'outils d'optimisation mathématique (la recherche opérationnelle). L'idée directrice consiste ici à tenter d'optimiser des décisions en s'appuyant sur des simulations et optimisations *a priori*. Bien que ces méthodes séduisent largement les chercheurs et consultants, elles n'intègrent que lentement les sphères décisionnelles des entreprises.

Dans les années 1970, l'avènement de l'informatique va conduire à une généralisation des outils de contrôle de gestion. Ainsi, les systèmes d'évaluation de performance vont s'étendre, au-delà de

la simple fonction de production, à toutes les activités de l'entreprise. Le contrôle de gestion va se reconstituer autour du contrôle budgétaire (analyse des écarts entre prévu et réalisé). Les premiers tableaux de bord vont se constituer et annoncer le début d'un pilotage généralisé de la performance.

Dans les années 1980, les gestionnaires vont émettre l'idée d'un pilotage axé sur les activités qui composent une entreprise, et plus généralement un système industriel. Des méthodes telles que l'Activity Based Costing (ABC) puis l'Activity Based Management (ABM) vont être développées (L. Ravignon et al., 1998).

Plusieurs propositions de gestion multicritère ont été émises au début des années 1990. Ainsi, aux États-Unis, R. S. Kaplan et D. P. Norton (1996) développent le principe du Balanced Score-Card (BSC) autour de quatre dimensions : finances, clients, processus et apprentissage. La communauté gestionnaire propose parallèlement de positionner le pilotage des systèmes industriels en fonction des objectifs, résultats et moyens qui lui sont associés. Enfin en France, une méthode - ECOGRAI (M. Bitton, 1990) - permettant de développer des systèmes d'indicateurs de performance à partir de l'analyse des objectifs et des variables de décision est proposée.

Le dernier grand courant de pensée est apparu en 1997 par l'intermédiaire du modèle SCOR (Supply-chain Council, 2000). Il s'agit dans ce cas de la définition d'un modèle de référence visant à piloter les chaînes logistiques en intégrant des indicateurs standard et des bonnes pratiques.

Pour plus de précisions, le lecteur intéressé pourra se reporter à la thèse de M. Lauras (2004), qui présente dans le détail ces différentes approches.

Toutes ces méthodes mettent en exergue plusieurs points :

- elles sont orientées sur le processus, qui crée de la valeur ajoutée du point de vue des clients ;
- le pilotage par la performance suppose le suivi des résultats du processus, mais aussi d'autres indicateurs tels que les variables de décision des décideurs, les moyens, les objectifs, etc ;
- il faut replacer le processus évalué par rapport à son système de décision. Deux approches sont alors envisageables. D'une part, ABC et surtout ABM organisent le système de pilotage par rapport aux processus. Cela permet de mesurer facilement toute l'activité associée à chacun des processus. De l'autre, les méthodes proposent une décomposition des objectifs de l'entreprise en cohérence avec le système de décision existant. Pour ce faire, ECOGRAI propose de structurer cette décomposition avec la grille et les réseaux GRAI.

Dans notre problématique, l'objectif de la notion de performance est de nous permettre de détecter qu'un système socio-technique connaît des dysfonctionnements. En effet, lorsqu'un système est soumis à des difficultés, il est nécessaire de mettre en place des indicateurs de performance, afin de connaître l'état du système et pouvoir le conduire. Ces indicateurs de performance vont également permettre de détecter un mauvais fonctionnement nécessitant un projet d'amélioration du système. En effet, dès lors que les commandes du système (variables de décision) ne permettent plus de faire revenir les indicateurs de performance dans une plage « normale », nous pouvons considérer que nous sommes en présence d'un système avec des dysfonctionnements majeurs. Dans la suite de la thèse, nous nous positionnons dans ce cas de figure.

2.2 État de l'art sur la modélisation d'entreprise

La modélisation d'entreprise selon F. Verdant (1999) « a pour objet la construction de modèles d'une partie déterminée d'une entreprise pour en expliquer la structure, le fonctionnement et en analyser le comportement ». Ainsi, l'un des objectifs essentiels de la modélisation d'entreprise est de produire de la connaissance sur une entreprise pour permettre une analyse. Ceci est au cœur de notre problématique de diagnostic des dysfonctionnements d'un système.

Le terme de modélisation d'entreprise ne restreint pas ce courant scientifique aux cas d'application sur des entreprises, mais trouve sa signification dans son origine historique : la modélisation d'entreprise a d'abord été développée pour modéliser des entreprises. Ainsi, nous considérerons son champ d'application à l'ensemble des systèmes socio-techniques, sans qu'il soit nécessaire d'en modifier les axiomes.

2.2.1 Les différents concepts de la modélisation d'entreprise

2.2.1.1 Les architectures de référence

Une architecture de référence d'un domaine propose « une structuration de la connaissance, un cadre de modélisation, un langage et le plus souvent une méthodologie » (H. Pingaud, 2005).

Pour la modélisation d'entreprise, les architectures de référence les plus importantes sont historiquement PERA (Purdue Enterprise Reference Architecture), CIMOSA (Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture) et GRAI/GIM (Grphe de Résultats et Activités Inter-reliées / GRAI Integrated Methodology). Elles ont donné naissance à l'architecture actuellement considérée comme la référence : GERAM (Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodology).

2.2.1.2 Les cadres de modélisation

Un cadre de modélisation est « une structure de modèles partiels reposant sur des dimensions, au sein duquel on chemine afin de comprendre le tout » (H. Pingaud, 2005). Il permet ainsi de réduire la complexité de la modélisation d'entreprise en proposant divers éléments de classification. En ce qui concerne la modélisation d'entreprise, les cadres de modélisation prennent en compte trois dimensions : les points de vue, l'instanciation et le cycle de vie.

Les points de vue vont définir l'ensemble des modèles partiels selon la partie du système que l'on souhaite modéliser.

L'instanciation va positionner l'ensemble des modèles, selon qu'ils correspondent à une vision générique (par exemple : les entreprises), partielle (par exemple : les entreprises pharmaceutiques) ou très particulière (par exemple : le groupe Pierre Fabre).

La dimension « cycle de vie » va positionner les modèles selon l'étape du cycle de vie du système auxquels ils correspondent. GERAM définit sept étapes dans un cycle de vie : l'identification, les

concepts, la définition du besoin, la spécification / conception, l'implémentation, l'opérationnel et le démantèlement.

Parmi les cadres de modélisation existant pour la modélisation d'entreprise, nous pouvons citer GIM ou encore la norme ENV 40003 (2000).

La norme européenne ENV 40003, « Framework for Enterprise Modelling », issue de l'architecture CIMOSA, définit les concepts génériques nécessaires pour la modélisation d'entreprise.

Les trois dimensions de l'architecture selon cette norme sont :

- la dimension du niveau de modélisation : l'élément de plus haut niveau est le périmètre du système étudié et la stratégie associée (identification et conceptualisation). Ensuite, les niveaux s'enchaînent avec la spécification des besoins, la conception, l'implémentation, la réalisation et le démantèlement.
- la dimension du niveau de généralité : trois niveaux de généralité sont explicites en allant du générique au spécifique, en passant par le niveau partiel (spécifique d'un domaine industriel).
- la dimension des points de vue :
 - le point de vue fonctionnel pour formaliser les processus régissant le modèle ;
 - le point de vue informationnel décrivant les objets de l'entreprise, leurs relations et leurs différents états possibles ;
 - le point de vue ressource pour la description des moyens nécessaires à la mise en œuvre des processus ;
 - le point de vue organisationnel, pour identifier les prises de décisions ainsi que les acteurs avec leurs relations.

Le cadre de modélisation de GIM (D. Chen et al., 1997) distingue quatre points de vue : fonctionnel, décisionnel, physique et informationnel. Par rapport à la norme ENV 40003, le point de vue décisionnel concerne la formalisation du système de prise de décision, alors que les points de vue fonctionnels et processus et système physique détaillent le point de vue fonctionnel de la norme. En effet, le point de vue fonctionnel de GIM correspond à la partie structurelle (description des activités à réaliser), le point de vue processus de GIM correspond à la partie comportementale (représentation fine de la réalisation des activités). Le système physique proposé par GIM correspond aux flux de production de biens matériels.

2.2.1.3 Panorama de méthodologies existantes

Une méthodologie est « un ensemble de méthodes qui contribuent à résoudre un problème en les utilisant selon des règles établies » (H. Pingaud, 2005).

Pour la modélisation d'entreprise, nous pouvons citer GRAI, MECI, PETRA, ACNOS, OLYMPIOS, OSSAD et SAF parmi celles existantes.

La méthodologie GRAI (G. Doumeingts, 2004) s'appuie sur le cadre de modélisation GIM et propose les phases suivantes :

- Modéliser l'existant (l'ordre de réalisation des modèles est important) ;

-
- Détecter les points forts, les points faibles, ainsi que les pistes de solution ;
 - Concevoir la cible et la modéliser ;
 - En déduire le plan d'action.

La méthodologie PETRA (L. Berrah et al., 2001) s'appuie sur un cadre de modélisation identifiant quatre points de vues : processus opérationnels, structure organisationnelle, système d'information, ressources. La méthodologie globale s'appuie sur un cycle Constat - Analyse - Décision - Réorganisation - Mise en œuvre - Évaluation qui peut se répéter autant de fois que nécessaire. Cette méthodologie accentue l'utilisation des indicateurs et des inducteurs de performance (leviers d'action agissant sur les niveaux de performance) pour l'évaluation et de pilotage des actions de réorganisation.

La méthodologie MECI (D. Gourc et C. Pourcel, 2005) se base sur une décomposition en trois points de vue : fonction et ressource, organisation, décision. La méthodologie générale se décompose comme suit :

- réaliser l'avant-projet :
 - appréhender le système ;
 - recueillir des informations ;
 - organiser le projet de modélisation ;
 - rédiger le cahier des charges du projet ;
 - présenter le cahier des charges et décider de la suite à donner au projet ;
- modéliser le système :
 - analyse des processus opérationnels et de soutien ;
 - analyse des processus de pilotage et de mesure ;
 - analyse du système de pilotage ;
 - réaliser le modèle ;
 - valider le modèle ;
 - rédiger le rapport ;
 - décider de la suite à donner ;
- utiliser le modèle :
 - démarrer un projet de simulation s'il est nécessaire de mieux connaître le fonctionnement du système, en apprécier les performances et mettre en évidence les dysfonctionnements ;
 - démarrer un projet de réingénierie du système.

La méthode ACNOS est issue de la volonté d'un groupe de travail multi-laboratoires de développer des méthodes et des outils de modélisation et d'intégration des activités et des processus semi-structurés ou non-structurés des entreprises manufacturières. La méthode est représentée par la figure 2.1. ACNOS propose trois angles de modélisation : les processus, les compétences et les indicateurs et inducteurs de performances. Une fois cette modélisation effectuée, l'analyse peut être menée de façon qualitative sur des graphiques, de façon formelle sur des Réseaux de Pétri Stochastiques Généralisés ou enfin par une approche simulateur.

Le modèle OLYMPIOS a pour objectif de construire le système d'information d'un exploitant donné de l'entreprise. Il se positionne clairement dans le cas des entreprises manufacturières et propose trois vues de l'entreprise :

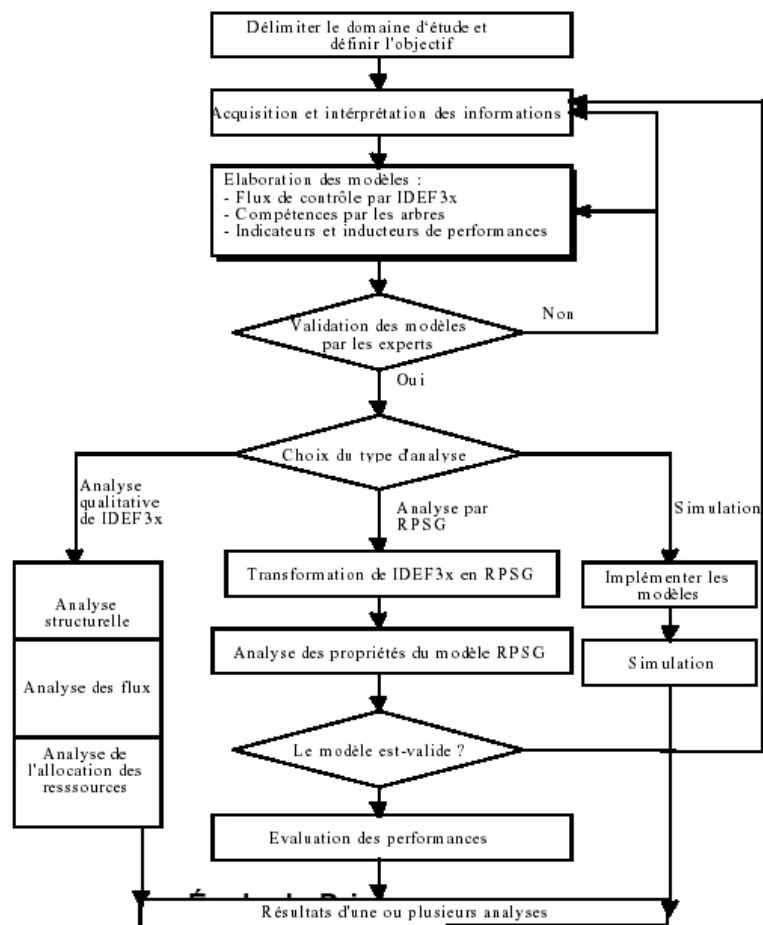


FIG. 2.1 – La méthode ACNOS.

-
- une vue structurelle et fonctionnelle, qui décrit les fonctions mises en œuvre dans l'entreprise en termes d'activités ;
 - une vue managériale, qui décrit l'entreprise à travers les objectifs assignés aux différents exploitants et leur réalisation ;
 - une vue comportementale, qui décrit l'évolution de l'entreprise en fonction des sollicitations internes ou externes.

La démarche d'audit proposée par OLYMPIOS comporte une phase de modélisation du système, suivie d'un diagnostic listant les dysfonctionnements représentés et caractérisés. Cette liste de dysfonctionnements permet de rechercher les causes potentielles des dysfonctionnements majeurs, afin de proposer des actions correctives à déclencher.

La méthode OSSAD vise à fournir des moyens permettant de décrire les différents niveaux de détail et de situation des processus d'une organisation. Plus généralement, elle cherche à énoncer des règles de structuration d'un projet de réorganisation. La méthodologie OSSAD est fondée sur des modèles, un vocabulaire et des principes d'action. Le modèle abstrait vise à représenter les objectifs, contraintes et productions des sous-ensembles identifiés. Le modèle descriptif représente les conditions actuelles ou envisagées de réalisation des objectifs formulés dans le modèle abstrait. Le modèle prescriptif transforme le modèle descriptif en prescriptions ou spécifications techniques et organisationnelles. Enfin, il faut noter que la méthode OSSAD s'accompagne d'une conduite de projet qui permet d'établir le lien entre tous ces formalismes et de les exploiter dans une optique de re-engineering.

La méthode SAF pour « Stages and Activities Framework » (cadre par étapes et activités) a été proposée par W. Kettinger et al. (1997), suite à un important travail de collecte et synthèse d'information. Après avoir analysé la littérature concernant le re-engineering des processus (BPR), rassemblé des informations et conduit des entretiens avec des consultants et des fournisseurs d'outils support, ils ont isolé une grande quantité d'instruments et les ont compilés dans un cadre de travail dit SAF. Il comprend six étapes, chacune décomposée en activités, comme le montre la figure 2.2. SAF s'intéresse surtout au point de vue fonctionnel du système à améliorer.

SAF comprend également un guide pour déterminer la nature et la portée du changement requis. Ainsi, pour les processus, plusieurs critères sont évalués :

- le coefficient stratégique de changement de processus (à partir de 11 facteurs notés entre 1 et 5 et du risque identifié par la direction) ;
- le degré de structuration du processus ;
- le coefficient d'orientation du processus vers un client externe ;
- le coefficient de potentiel des technologies de l'information sur ce processus.

Pour le coefficient stratégique de changement de processus, soit la valeur obtenue est plutôt élevée et alors l'accent devra être mis sur les activités de management du changement et de formulation de nouveaux processus, soit la valeur obtenue est plutôt faible et l'accent devra être mis sur les activités d'amélioration incrémentale des processus existants.

Pour le degré de structuration du processus, si la valeur obtenue est élevée, l'orientation portera sur les activités S4A1 et S4A2 correspondant à l'élaboration de nouveaux processus, alors que si la valeur obtenue est faible, la démarche s'orientera vers les activités S3A1 et S3A2 d'analyse et documentation des processus actuels.

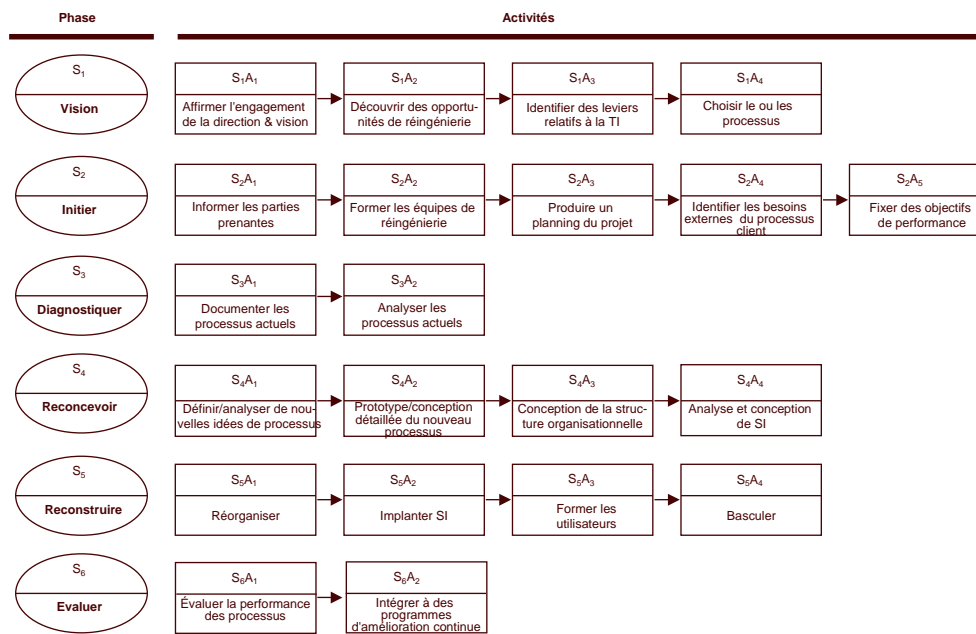


FIG. 2.2 – La méthode SAF, d’après W. Kettinger et al. (1997).

Pour un coefficient d'orientation vers un client externe important (le processus a un objectif de clientélisation), l'accent doit être mis sur l'activité S2A4, pour identifier les besoins du processus client.

Enfin, si le coefficient de potentiel des technologies de l'information se révèle important, alors l'accent sera mis sur les activités S4A4 et S5A2, qui utilisent les technologies de l'information pour développer les capacités organisationnelles.

2.2.1.4 Panorama des modèles disponibles

Un modèle est « une représentation d'une abstraction de la réalité exprimée dans un langage » (H. Pingaud, 2005). Pour chacun des points de vue (cf. 2.2.1.2) du cadre de référence, un ensemble de modèles est disponible.

2.2.1.4.1 Le point de vue fonctionnel Pour modéliser les processus d'une entreprise, plusieurs formalismes sont disponibles. Le plus connu est IDEF0 (ou SADT) (M. Lissandre, 1990). Il s'agit d'une représentation graphique. Les primitives utilisées sont très simples : des boîtes représentant des activités et des flèches représentant les relations entre les activités. Les relations peuvent être de quatre types en regard d'une activité : entrée, sortie, contrôle, moyens. IDEF2 (E. Lutherer, 1996) et IDEF3 (F. Verdant, 1999) complètent IDEF0 en lui apportant les aspects dynamiques et logiques. Outre ces modélisations graphiques, un langage formel de description des processus opérationnels est proposé par CIMOSA (F. Verdant, 1999). Les diagrammes d'activité d'UML (F. Darras, 2004), le modèle conceptuel des traitements de MERISE (H. Tardieu et al., 2000), les Réseaux de Pétri, BPMN (Business Process Modeling Notation) (BPMI, 2005), sont également des formalismes de modélisation de processus.

2.2.1.4.2 Le point de vue informationnel Trois formalismes sont très employés pour modéliser graphiquement les objets d'entreprise : diagramme entités-associations (H. Tardieu et al., 2000), IDEF1/IDEF1x (F. Darras, 2004) et diagramme de classes d'UML. Pour Entités-Associations, la primitive Entité est un ensemble d'objets ayant chacun une existence propre, partageant un ensemble de propriétés et représentant un intérêt pour le système modélisé. Une association est une relation entre plusieurs entités. IDEF1x est très proche, quelques éléments graphiques changent. Un langage formel de description a été défini : Express (ISO DIS 10303-11, 1992).

2.2.1.4.3 Le point de vue ressource Il s'agit de modéliser le sous-système physique qui comprend les moyens de production, de transport, les opérateurs humains et les outils informatiques. CIMOSA (F. Verdant, 1999) propose deux primitives : les ressources et les ensembles d'aptitudes. Il est donc possible de faire un modèle statique des ressources (capacité, mode de gestion, attributs de fiabilité, attributs d'aptitudes ou de compétences, attributs relatifs aux opérations). Le modèle dynamique d'une ressource permet de représenter le fonctionnement interne (usure, pannes...) et la gestion de la ressource. Nous pouvons retenir les Réseaux de Pétri, le Grafset et le Statechart qui permettent de représenter la dynamique des différents états d'une ressource. La modélisation hiérarchique des ressources permet de représenter les ressources par niveau d'agrégation, afin de limiter la complexité du modèle. La modélisation des aptitudes et des compétences proposées par les ressources et requises par les activités peut être décrite par un modèle Entité-Association.

2.2.1.4.4 Le point de vue organisationnel Selon H. Mintzberg (1982), il faut distinguer, dans l'organisation d'une entreprise, la structure organisationnelle d'une part, et la coordination des tâches d'autre part.

La modélisation d'une structure organisationnelle peut se faire au travers de l'organigramme. CIMOSA a également proposé un langage formel de description des organisations (F. Verdant, 1999). La modélisation GRAI (G. Doumeingts, 1984, 2004) a été conçue pour réaliser la modélisation de la coordination des tâches par la grille GRAI, qui représente l'ensemble des centres de décision d'un système donné. Un centre de décision résulte du croisement d'une fonction de l'entreprise et d'un horizon/période de décision, reliés par des cadres de décisions et des flux d'information, en précisant les responsables de la décision. Le réseau GRAI (M. Roboam, 1993) décrit le processus de prise de décision d'un centre de décision. Grille et réseaux GRAI outillent la vue décisionnelle au sens de GIM.

2.2.2 PETRA, un guide méthodologique pour une démarche de réorganisation industrielle

Après avoir fait un tour d'horizon de la modélisation d'entreprise et des instruments à notre disposition, nous nous focalisons sur PETRA, qui ressort de cet état de l'art comme la méthode la plus orientée vers notre objectif d'amélioration de systèmes socio-techniques présentant des dysfonctionnements majeurs, étant donné qu'elle a été conçue dans ce but.

La démarche PETRA est fondée sur six principes majeurs :

1. la démarche de réorganisation est un processus doué d'un comportement ;
2. la démarche de réorganisation repose sur un cycle de vie en spirale, conformément à la roue de Deming (cf. figure 2.3) ;
3. la démarche de réorganisation s'effectue par niveau : afin de maîtriser la réorganisation d'un système complexe, la réalisation des étapes de la démarche par niveau de granularité du système est préconisée ;
4. la démarche de réorganisation repose sur une vision de l'entreprise fondée sur quatre aspects essentiels : les processus opérationnels, les systèmes d'information, la structure organisationnelle et les ressources (d'autres aspects pourraient être considérés au besoin comme les aspects sociaux, financiers, etc) ;
5. la démarche de réorganisation est centrée performance, des indicateurs de performance étant mis en place pour juger l'état du système à réorganiser et piloter la démarche en elle-même ;
6. la démarche de réorganisation se gère de manière participative.

Chacun de ces principes est explicité plus avant dans un document de référence (L. Berrah et al., 2001).

La démarche PETRA se découpe en sept phases, notées A à G :

- A** Constat du besoin de réorganisation dans un domaine ;
- B** Analyse de l'environnement du domaine d'étude ;
- C** Analyse de l'existant du domaine d'étude et déploiement des objectifs ;
- D** Choix de l'opportunité ;

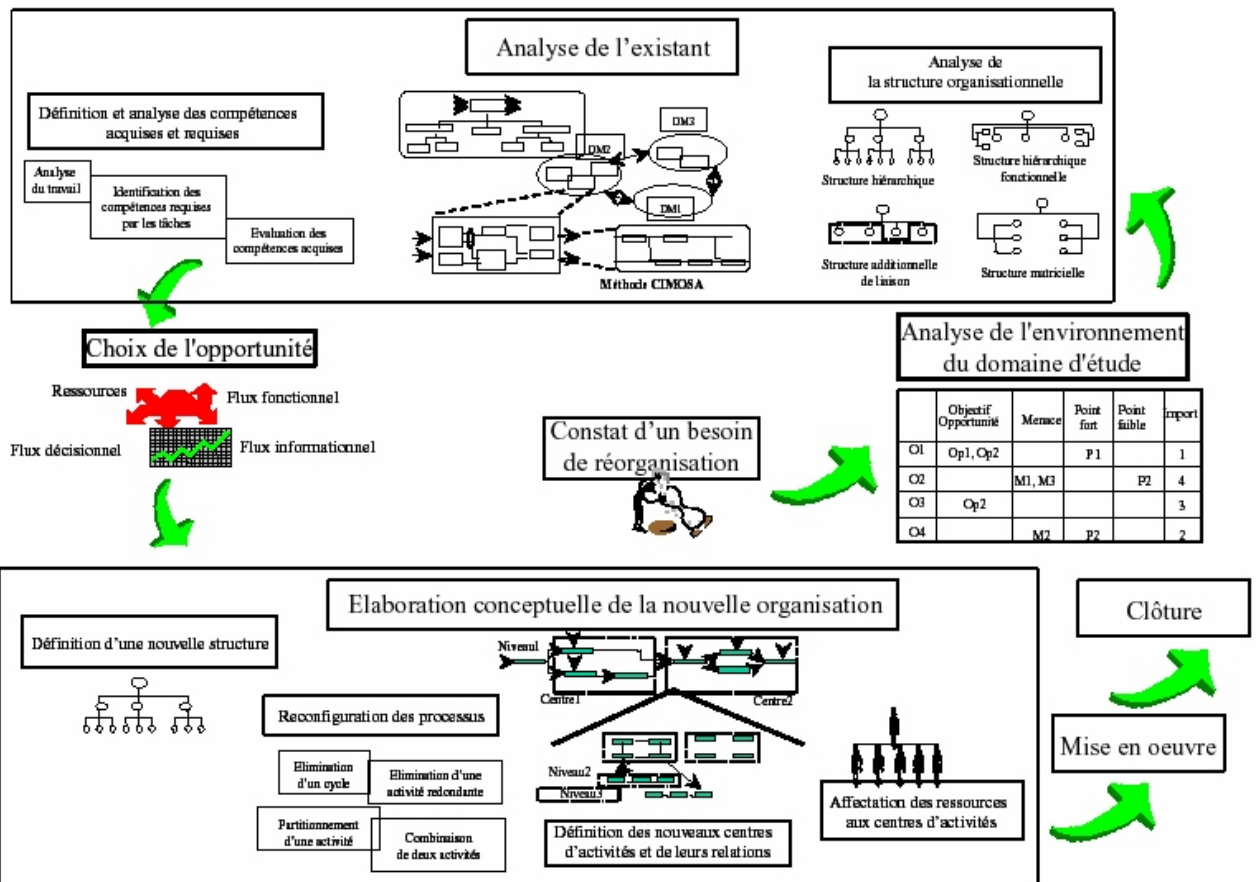


Fig. 2.3 – La démarche PETRA.

E Élaboration conceptuelle de la nouvelle organisation ;

F Mise en œuvre ;

G Clôture.

Chacune de ces phases se décompose elle-même en sous-phases. Pour chaque phase et sous-phase, une « fiche-guide » présente une durée approximative de l'étape, la définition de l'étape, les entrées requises, les sorties attendues, la description de l'enchaînement des actions à réaliser (comportement), les acteurs, des outils et des observations diverses.

2.3 État de l'art sur l'amélioration de systèmes industriels

Les systèmes socio-techniques nécessitent une permanente adaptation à l'évolution de leur environnement. Prenons l'exemple de l'histoire de la plus ancienne entreprise de France. « *Saint-Gobain a été créé en 1665 dans le cadre du plan de relance économique de la France voulu par Louis XIV et Colbert. Confiée à des entrepreneurs privés, la société a rompu dès l'origine avec la tradition artisanale des manufactures en organisant la production [...] selon une logique industrielle. Grâce à une invention technologique décisive, le coulage du verre en table (1688), elle s'empare d'un quasi-monopole en Europe au XVIII^e siècle et prend le relais de Venise* » (Saint-Gobain, 2005). Dans cet exemple, nous pouvons remarquer la création d'une logique industrielle en lieu et place de l'organisation artisanale traditionnelle. Ceci correspond à une évolution d'un système socio-technique, afin de l'adapter à son environnement.

Actuellement, l'environnement des systèmes socio-techniques connaît une accélération de son rythme d'évolution sous l'effet combiné de la mondialisation de l'économie et de la société (concept du village mondial), des innovations technologiques (électronique, internet, bio-technologies, nano-technologies, énergie...) et de l'évolution du contexte géopolitique planétaire (émergence d'ensembles supra-nationaux, évolutions des tensions post Guerre Froide, émergence du développement durable, évolutions diverses des pays dits « du Sud »...). Leur survie dépend en partie de leur agilité pour évoluer dans cet environnement mouvant.

2.3.1 Les différentes approches

Nous pouvons définir plusieurs classements pour l'amélioration des systèmes industriels. Tout d'abord, une distinction peut être faite selon l'approche adoptée.

En effet, il est possible d'améliorer un système socio-technique en procédant à :

- une maîtrise de l'existant ;
- une amélioration continue (dite aussi incrémentale) ;
- une amélioration par percée (dite aussi discontinue) ;
- une innovation.

Dans le cas de la maîtrise de l'existant, le système se trouve dans une situation où ses inducteurs de performance permettent encore de faire revenir les indicateurs de performance du système existant dans des plages de fonctionnement normales. En revanche, dans les trois autres cas de figure, ces

inducteurs de performance ne le permettent plus et la modification du système devient nécessaire pour retrouver des indicateurs de performance conformes aux attentes.

Les systèmes socio-techniques étant complexes par nature, il est illusoire de croire qu'une quelconque modification d'un de ces systèmes va correspondre *parfaitement* aux objectifs attendus. La maîtrise de l'existant consiste donc - *a posteriori* - à déterminer les méthodes de travail et les modes d'organisation les plus adaptés pour obtenir les niveaux voulus de services et de conformité des produits. Ces niveaux de service et de conformité doivent être stabilisés autour de niveaux cibles, tout en réduisant la dispersion en dessous (sous-qualité) et au-dessus (sur-qualité). La maîtrise de l'existant prend tout son sens avec le temps, puisqu'elle doit permettre d'éviter une dégradation du système au fur et à mesure des évolutions de l'environnement extérieur.

L'amélioration continue est une approche par « petits pas ». Elle a, par essence, un caractère permanent et concerne tout le monde, en particulier les opérateurs qui sont invités à faire des propositions et à prendre des initiatives. Elle s'appuie sur les groupes de résolution de problèmes, les cercles de qualité ou tout autre dispositif qui favorise la participation et la mobilisation du personnel. Ce type d'amélioration est préconisé aujourd'hui dans la version 2000 de la norme ISO 9000 (G. Laudoyer, 2000). La démarche japonaise appelée Kaizen (M. Imai, 1998) en est l'archétype.

L'amélioration par percée est à l'opposé de la précédente, puisqu'elle se réalise sur une portée temporelle limitée. Les propositions et actions d'amélioration proposées sont par nature plus importantes que dans l'amélioration continue. Les modes d'action sont ici moins participatifs et relèvent souvent d'un niveau de décision ou de responsabilité élevé. C'est en quelque sorte un « coup de rein » pour faire un saut. Elle est souvent retenue lorsque l'amélioration continue ne suffit plus à rétablir les niveaux de performance. Le système de management Hoshin Kanri (Y. Akao, 2004) est un bon support de l'approche d'amélioration par percée.

L'innovation peut être vue comme la mise en œuvre d'une invention pour la production de nouveaux biens ou services, l'amélioration de biens ou de services existants ou le perfectionnement de leur mode de production ou de distribution. Dans le cas d'innovation du processus de production ou du produit, l'innovation permet de progresser par un saut technologique.

Dans la pratique, ces quatre approches peuvent s'enchaîner. Une méta-démarche pourrait donc être d'essayer d'abord de maîtriser l'existant, puis de l'améliorer selon la philosophie de l'amélioration continue. L'avantage de ces deux étapes est de ne pas bousculer le système considéré et de permettre une certaine continuité de l'état existant. Ensuite, la méta-démarche peut se poursuivre par de l'amélioration par percée dans le cas où une évolution notable est nécessaire, mais pour laquelle l'évolution est connue. Enfin, dans le cas d'une évolution notable qui est nécessaire, mais où cette évolution est inconnue, nous allons parler d'innovation.

2.3.2 Les différents supports

L'amélioration des systèmes industriels peut être subdivisée selon la portée des supports utilisés. À l'image de J. Bufferne et P. Corbrejaud (2001), la littérature distingue :

- les démarches ;
- les méthodes ;

-
- les outils.

Les démarches d'amélioration sont génériques et engagent durablement plusieurs secteurs de l'entreprise sous la responsabilité de la direction. On citera la Production au Plus Juste (J. Womack et D. Jones, 1996), le Kaizen (M. Imai, 1998), le Six Sigma (M. Pillet, 2004), le Management par la Qualité Totale (TQM : Total Quality Management) (S. Shiba et al., 2003), la Maintenance Productive avec la participation de tous (TPM : Total Productive Maintenance) (Japan Institute of Plant Maintenance, 1997) et le Business Process Reengineering (M. Hammer et J. Champy, 1993).

Les méthodes, dont la portée spatio-temporelle est plus limitée, soutiennent les démarches, mais peuvent aussi être utilisées seules. Ce sont par exemple le SMED (Single Minute Exchange of Die, Changement d'Outils en Moins de Dix Minutes) (S. Shingo, 1987) ou l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leurs Criticités).

Enfin, les outils servant à l'amélioration des systèmes industriels peuvent être utilisés pour :

- analyser une situation (les plans d'expérience, l'analyse de données, le diagramme en arête de poisson, les cartes de contrôle, l'analyse de la valeur, etc) ;
- faire ressortir les solutions (le brainstorming, le vote pondéré, etc) ;
- visualiser les résultats (outils de communication visuelle, affichage, etc) ;
- modifier l'existant (poka-yoke, etc).

Ainsi, la démarche de production au plus juste (Lean Manufacturing) vise à réduire ou supprimer les causes de non création de valeur ajoutée pour le client. Ponctuellement, sa mise en œuvre exigera de réduire le temps de changement d'outils d'une machine par la méthode SMED, de diminuer les rebuts d'un poste après analyse par une AMDEC ou d'en maîtriser la production par une MSP (Maîtrise Statistique des Procédés). Chacun de ces chantiers particuliers nécessitera un certain nombre d'outils (brainstorming, Pareto...).

Cependant, pour la suite de nos travaux, nous n'effectuerons plus la distinction entre méthodes et outils, nous utiliserons seulement le terme générique d'instruments. Nous en retiendrons deux objectifs essentiels que sont l'analyse d'une part et l'action d'autre part. Ainsi, nous considérerons la modification de l'existant, l'émergence de solutions ou la visualisation des résultats comme des instruments d'actions.

Nous pouvons remarquer que les différents supports que nous allons présenter sont principalement centrés sur les points de vue des ressources et processus physiques. En effet, historiquement, ce sont ces deux aspects de la question qui ont été prépondérants. Les aspects organisationnel, décisionnel et informationnel ont pris de l'ampleur plus récemment (notamment avec le déploiement des systèmes d'information), ce qui explique qu'ils soient absents des centres d'intérêts de ces supports historiques.

Une autre classification des différentes démarches a été proposée par T. Siebenborn (2005). Il différencie les démarches de type « top-down » (par exemple : BPR), de celles qui sont « bottom-up » (par exemple : Kaizen) ou encore de celles qui sont pilotées par une équipe transfonctionnelle dédiée (par exemple : TQM). Il propose également dans cette thèse d'appréhender le choix d'une démarche en fonction de la structure d'organisation de l'entreprise. Ainsi, une démarche Kaizen est compatible avec des structures d'organisation de type simple, bureaucratie professionnelle ou structure divisionnalisée, alors que le Six Sigma est plutôt compatible avec la bureaucratie mécaniste et l'adhocratie.

Depuis le début de ce chapitre, nous avons introduit les notions d'approches, de démarches et d'instruments. Il est important de lier ces trois notions entre elles. Les instruments sont utilisés par une ou plusieurs démarches pour réaliser une ou plusieurs tâches précises. Les démarches peuvent s'inscrire dans une ou plusieurs approches. Une entreprise souhaitant mettre en œuvre une approche par amélioration continue sait qu'il ne faut pas aller chercher une démarche BPR, mais plutôt des démarches comme le TQM ou le Kaizen, par exemple.

2.3.2.1 Les démarches centrées sur l'élimination du gaspillage

Il s'agit des démarches de Production au Plus Juste et de Kaizen qui cherchent à supprimer le « muda », gaspillage en japonais. Nous pouvons remarquer que ces deux démarches s'apparentent plutôt à un système de management, une sorte de « philosophie », qu'à une méthodologie de travail au sens strict.

2.3.2.1.1 La Production au Plus Juste ou Lean Manufacturing Après la seconde guerre mondiale, le Japon s'est trouvé dans un environnement économique marqué par :

- un marché restreint, mais demandeur de produits de tout type, nécessitant de travailler en petites séries ;
- la pénurie de matières premières et de ressources obligeant à éviter le gaspillage de matière ;
- une main-d'œuvre très liée à l'entreprise pour des raisons culturelles et salariales (les salaires dépendent fortement de l'ancienneté), permettant d'investir durablement dans les actions de formation et de favoriser la responsabilisation à tous les niveaux, et par suite de rompre avec le principe taylorien de stricte séparation entre l'exécution et la réflexion.

Sur ces bases, Toyota - principalement - a bâti un système de production baptisé Just-In-Time (JIT) ou Juste-À-Temps (JAT). Dans les années 1980, avec le renversement du rapport entre l'offre et la demande, les USA et l'Europe ont découvert que la production de masse était inadéquate et que le modèle du juste-à-temps s'avérait beaucoup plus adapté aux conditions nouvelles. En 1985, une étude fut commanditée au MIT par les grands constructeurs automobiles, afin de comprendre la force du système japonais. Cette étude fut à l'origine du concept de « lean production » (littéralement : production maigre), par opposition à « mass production ». En français, cette appellation est devenue « production au plus juste ».

La production au plus juste (comme le juste-à-temps) est centrée sur la création de valeur ajoutée pour le client. L'idée forte (la philosophie) est de considérer que tout ce qui nuit à cette création de valeur, les dysfonctionnements de toute nature, les opérations sans valeur ajoutée, sont du gaspillage (de temps, d'argent, d'énergie) et que l'élimination du gaspillage doit être recherchée. Parmi les principales sources de gaspillage, on trouve :

- les transports des produits semi-finis et des encours entre les zones de stockage et les machines ;
- les attentes causées par les stockages intermédiaires, les manques de pièces, les goulots d'étranglement ;
- les mouvements et manipulations superflus : rangements inadaptés, recherche d'outils, multiplication des stockages intermédiaires ;
- les défauts de production ;

-
- les processus de travail inadaptés ;
 - les stocks élevés ;
 - la surproduction : produits semi-finis ou finis destinés à être stockés sans commande spécifique d'un client ;
 - les accidents.

Une remarque s'impose : une opération sans valeur ajoutée n'est pas obligatoirement une opération inutile (sinon, on la supprime purement et simplement). En général, toute opération a une raison d'être. Avant de supprimer une opération sans valeur ajoutée, il faut en premier lieu en connaître les causes et s'attaquer à ces causes.

Le principal outil du Lean Manufacturing est le Value Stream Mapping, qui permet de réaliser l'analyse des flux de valeur ajoutée et donc de détecter les pistes d'amélioration.

Le Lean Manufacturing est - dans l'esprit - une démarche d'amélioration en douceur, continue.

2.3.2.1.2 Le Kaizen ou amélioration progressive au quotidien En japonais, le mot « Kaizen » signifie améliorations, sans gros moyens, en impliquant tous les acteurs, du directeur aux ouvriers, et en utilisant surtout le bon sens commun. La démarche repose sur des petites améliorations faites jour après jour. C'est une démarche graduelle et douce, qui s'oppose au concept plus occidental de réforme en profondeur. Pour caricaturer, lorsqu'un atelier ou un service fonctionne mal, la réponse Kaizen est de se dire : « Il y a des problèmes, reconnaissons-le. On ne résoudra pas tout d'un coup. Mais il faut chaque jour arriver à améliorer un point ».

Le Kaizen demande lui aussi une impulsion de la direction, mais implique plus spécifiquement l'encadrement. Le Kaizen peut être initié de différentes manières. Pour susciter l'adhésion et l'intérêt du personnel et des opérateurs, la priorité doit être donnée aux actions concrètes et proches du terrain. Il est préférable de commencer par des actions dont les résultats sont visibles rapidement. Habituellement, les premières actions portent sur la simplification du travail pour rendre le travail des exécutants plus productif, moins fatiguant, plus efficace et sûr. Une autre approche consiste à améliorer les équipements, notamment en installant des systèmes de détrompeurs (poka-yoke) et/ou à réaménager les postes de travail en changeant la disposition des machines. Une fois que l'intérêt de la démarche a été montré, preuves à l'appui, et que l'adhésion est acquise, on peut passer aux actions moins concrètes, mais tout aussi indispensables, portant sur la révision des procédures de travail, la mise en place de relevé des pannes et incidents, la tenue à jour par l'équipe des procédures standard et des règles de travail.

Le Kaizen suit le principe de la roue de Deming. La première étape est d'analyser l'existant, de déterminer les performances actuelles et d'estimer dans quelle mesure et comment ces performances peuvent être améliorées. Puis on passe à la recherche de solutions, à leur analyse et au choix des solutions à garder et à mettre en œuvre. Une idée d'amélioration peut émerger « spontanément » ou être la réponse à un problème formulé, et pour lequel on cherche une solution. Quand ces solutions ont été appliquées et validées, que les nouvelles performances sont stabilisées, on révisé les standards.

La démarche Kaizen doit être contrôlée et un cadre formel doit être mis en place pour veiller aux dérives. Dans un contexte industriel, il n'est pas concevable que n'importe qui puisse « bricoler » dans son coin les produits ou process sous prétexte d'amélioration. Le plus souvent, le Kaizen est

piloté par des groupes d'amélioration et s'accompagne d'un système de recueil de suggestions (Teian en japonais) sous forme de « boîte à idées », qui permet à chacun, quel que soit son rang, de faire connaître ses observations, les points d'amélioration à creuser et de proposer ses idées. Celles-ci sont évaluées par un comité compétent. Les suggestions retenues et mises en application se voient généralement récompensées (par exemple, un pourcentage sur les gains réalisés).

Avant de commencer un chantier Kaizen, il est souhaitable de former les personnes impliquées aux outils de base de la qualité. Une tradition venue du Japon veut qu'ils soient au nombre de sept (cf. figure 2.1). Le principe de base est simple : pour comprendre, il faut voir. C'est pour cela que tous les outils sont des outils graphiques. Ces outils ont pour but de :

- donner des moyens simples à tous les membres de l'entreprise pour résoudre les problèmes ;
- pouvoir être utilisés par l'ensemble du personnel de l'entreprise ;
- être adaptés au travail de groupe, car ils sont visuels et consensuels.

L'objectif principal est de donner un nombre limité d'outils de résolution de problèmes (cf. tableau 2.1) à l'ensemble du personnel. Connus de tous dans l'entreprise, ils forment les fondations d'une culture d'entreprise pour l'approche formelle d'une solution. Il convient de noter que suivant les sources bibliographiques, les sept outils de base de la qualité divergent. On retrouve constamment le noyau composé des quatre outils suivants : histogramme, diagramme de Pareto, diagramme de cause-effet, diagramme de corrélation.

TAB. 2.1 – Des outils du Kaizen.

Outils	Fonctions
Feuilles de relevés	Collecter les données
Diagramme de concentration des défauts	Faire apparaître les faiblesses
Histogramme	Illustrer les variations
Diagramme en arêtes de poisson	Identifier l'origine du problème
Diagramme de corrélation	Mettre en évidence les corrélations
Diagramme de Paréto	Hiérarchiser les faits
Carte de contrôle	Maîtriser le procédé

2.3.2.2 Les démarches centrées sur la réduction des défauts

Les deux démarches présentées ici sont plutôt considérées comme des méthodologies de travail directement applicables, que comme des principes de management très généraux.

2.3.2.2.1 Le management par la qualité totale ou TQM Le management par la qualité totale (S. Shiba et al., 2003) prône l'utilisation d'une approche scientifique qui conduit à considérer la diversité des solutions possibles et à en retenir la meilleure. La méthodologie du TQM est découpée en sept étapes :

1. choisir un thème d'amélioration (celui-ci doit être un fait concret et non un concept abstrait) ;
2. recueillir et analyser les données pour découvrir les types de défauts se produisant le plus souvent ;

-
3. analyser les causes (pour remonter jusqu'à la cause première) ;
 4. préparer et appliquer la solution (pour prévenir la réapparition de la cause première) ;
 5. évaluer les effets (pour vérifier les nouvelles données et s'assurer que la solution a bien fonctionné) ;
 6. normaliser la solution (pour remplacer de façon permanente l'ancien processus par le processus amélioré) ;
 7. réfléchir au processus et au problème suivant.

Le TQM propose également des outils pour instrumenter ces différentes étapes, ce sont les sept outils de la qualité :

- la feuille de recueil de données / stratification ;
- le diagramme de Paréto ;
- le diagramme d'Ishikawa ;
- les graphes ;
- les cartes de contrôle ;
- les histogrammes ;
- les diagrammes de dispersion.

Ces outils interviennent surtout dans les étapes 1 à 3 et dans l'étape 5.

Le management de type Hoshin est particulièrement adapté à cette approche, étant donné qu'il prône la focalisation de tous sur un nombre restreint d'objectifs, afin de réaliser des avancées significatives.

En ce qui concerne le choix du thème d'amélioration, le TQM donne des indications telles que travailler sur un processus permanent de l'entreprise, être orienté sur les cinq maux classiques (défauts, erreurs, retards, gaspillages, accidents) ou encore être « market-in », être en lien fort avec les clients.

La normalisation ISO 9000 version 2000 peut être considérée comme la normalisation du TQM. Cette version définit que tout est processus et prône l'amélioration continue comme démarche permettant d'arriver à la qualité.

2.3.2.2.2 Le Six Sigma : réduire la variabilité à tous les niveaux L'approche Six Sigma, initiée par Motorola en 1985, est une approche globale de l'amélioration de la qualité du produit et des services rendus au client, fortement inspirée de la MSP (Maîtrise Statistique des Procédés). Mais elle n'en constitue pas une variante, car elle va bien au-delà. Elle s'étend à toute l'entreprise (production, process, conception produit et process de production), possède une structure de projet spécifique et est fortement orientée client. Il s'agit d'une méthode de réduction des défauts comme l'est le TQM. Certains auteurs (S. Shiba et al., 2003) parlent même du Six Sigma comme le « TQM de Motorola ».

Pour illustrer le concept, considérons une doseuse calibrée pour produire des doses de 500 mg d'un principe actif. Si on mesure très précisément les doses en sortie, on obtiendra des mesures autour de 500 mg. De plus, si tout est parfaitement réglé, la moyenne des mesures sera de 500 mg. Tout processus, qu'il soit de production ou administratif, est incapable de produire exactement le même résultat sur la durée. Cette variabilité est incontournable et il faut être capable de « vivre avec ». Il n'est donc pas possible d'obtenir des doses parfaitement identiques. Cela est dû aux fluctuations du procédé de fabrication.

Ces fluctuations sont de deux sortes. D'une part, les fluctuations inhérentes au procédé, appelées aussi la signature du procédé. Elles sont dues à de nombreux facteurs aléatoires et inévitables : positionnements de pièces qui diffèrent légèrement, variations de température dans l'atelier, homogénéité imparfaite de la matière, etc. On les rattache aux 5M d'Ishikawa : Machine, Main-d'œuvre, Milieu, Méthodes, Matières. Ces fluctuations inhérentes sont souvent modélisées par une loi normale. Lorsque le processus est opérationnel, il n'est pas possible d'agir sur ces fluctuations. D'autre part, les fluctuations imputables à des facteurs externes de variabilité : on les attribue à des phénomènes que l'on peut identifier (usure des outils, vibrations, etc) et par conséquent sur lesquels on peut agir. Ces fluctuations ont une cause et sont dites assignables. Ce sont elles que l'on va chercher à maîtriser par la mise en place de cartes de contrôle.

TAB. 2.2 – Illustration du passage de 3 à 6 sigma.

3 sigma	6 sigma
20 000 lettres égarées par jour	7 lettres égarées par an
15 minutes d'eau non potable par jour	1 minute d'eau non potable tous les 7 mois
5 000 opérations chirurgicales à problèmes par semaine	1,7 opérations chirurgicales à problèmes par semaine
2 atterrissages d'avions incertains par jour	1 atterrissage d'avions incertains tous les 5 ans
7 heures de coupure d'électricité tous les mois	1 heure de coupure d'électricité tous les 34 ans

La démarche Six Sigma considère la réduction de la variabilité (cf. tableau 2.2) comme un élément clé pour l'amélioration des processus et repose sur une organisation très encadrée, dédiée à la conduite de projet. Pour pouvoir progresser, il faut mesurer le niveau de qualité actuel et pouvoir se donner un objectif vérifiable. La qualité sera d'autant plus grande que le nombre de sigma visé sera élevé (en théorie : 6).

Le Six Sigma est une approche globale qui se décline de plusieurs façons :

- une philosophie de la qualité tournée vers la satisfaction totale du client ;
- un indicateur de performance permettant de savoir où se situe l'entreprise en matière de qualité ;
- une méthode de résolution de problème permettant de réduire la variabilité sur les produits ;
- une organisation des compétences et des responsabilités des hommes de l'entreprise ;
- un mode de management par la qualité, qui s'appuie fortement sur une gestion par projet.

Pour appliquer le Six Sigma, on suit la méthode DMAIC (Define, Measure, Analyse, Improve, Control) qui se traduit en français par : Définir, Mesurer, Analyser, Améliorer, Maîtriser. Cette méthode est proche du PDCA de Deming, mais contrairement à ce dernier, elle définit les outils (statistiques ou non) nécessaires à la réalisation de chaque étape (cf. tableau 2.3).

Le Six Sigma ne peut être mis en œuvre sans une organisation des compétences rigoureuse. Une fois le projet et le délai de traitement définis, il faut créer l'équipe projet constituée de Sponsor, Master Black Belt, Black Belt et Green Belt.

2.3.2.3 Une démarche centrée sur le rendement des ressources, la Maintenance Productive ou TPM

À l'opposé des démarches précédentes qui sont orientées sur les processus (réduction des défauts et du gaspillage), nous allons maintenant aborder une démarche qui se focalise sur le rendement des

Tab. 2.3 – Des outils du Six Sigma.

Phases	Fonctions	Outils associés
Définir	Bien définir le problème, les limites de remise en cause et l'équipe de travail	QOQCP et 5 pourquoi
Mesurer	Trouver un moyen de mesure de la qualité, vérifier la capacité du moyen de mesure et recueillir les faits	Test de répétabilité et reproductibilité, feuille de relevés, carte d'observation
Analyser	Identifier les causes de la variabilité	Diagramme en arêtes de poisson, test de comparaison de moyennes, de variances et de fréquences, analyses factorielles, régressions multiples
Améliorer	Expérimenter, modifier, optimiser, prouver statistiquement que les modifications sont efficaces	Déballage d'idées, plan d'action, plans d'expérience, tests de comparaisons
Maîtriser, contrôler et standardiser	Appliquer la solution, la mettre sous contrôle, pérenniser la solution et déployer les bonnes pratiques	Carte de contrôle, fiches de poste

ressources utilisées par ces processus, ces ressources pouvant être des équipements ou des ressources humaines. En effet, il ne faut pas oublier que la TPM s'occupe également de la minimisation des accidents et de la sécurité au poste de travail.

La TPM (Total Productive Maintenance), Maintenance Productive avec la participation de tous, est basée sur les travaux de groupe, exécutés grâce à la participation de tous, que ce soit verticalement (hiérarchique) ou horizontalement (différents services et départements de l'entreprise). Le concept de « maintenance d'amélioration » dérive du concept classique de maintenance. Son objectif est que les équipements soient tels qu'ils ne tombent pas en panne, qu'ils soient faciles à inspecter, à réparer, à utiliser et qu'ils fonctionnent en toute sécurité. La TPM peut se résumer par sa volonté d'aboutir à la création d'une structure d'entreprise qui permette la recherche du rendement maximum du système de production, en évitant donc toutes pertes, afin d'obtenir zéro accident, zéro défaut, zéro panne sur la durée de vie du système de production.

Pour réaliser cet objectif, il est nécessaire de s'appuyer sur les huit piliers suivants :

1. éliminer systématiquement les causes de pertes pour améliorer le rendement des équipements ;
2. mettre en place un système de maintenance autonome ;
3. mettre en place un système de maintenance planifiée ;
4. former et entraîner aux techniques de production et de maintenance ;
5. mettre en place un système de conception et démarrage de nouveaux équipements ;
6. mettre en place un système de maintenance de la qualité des produits ;

-
7. mettre en place un système d'amélioration du rendement administratif ;
 8. mettre en place un système de pilotage de la sécurité et de l'environnement.

Ces huit piliers vont permettre de réduire les six grands types de pertes qui réduisent le rendement des équipements :

1. pertes dues aux pannes ;
2. pertes dues aux changements de série et aux réglages ;
3. pertes dues à la marche à vide et aux micro-arrêts ;
4. pertes dues au ralentissement et à la sous-vitesse ;
5. pertes dues aux défauts et aux retouches des produits ;
6. pertes dues aux redémarrages et au rendement matière.

Cette approche ne fournit pas une méthodologie précise à appliquer directement pour mener un projet TPM. En revanche, une boîte à outils existe pour réduire les six types de pertes. Ainsi, le changement rapide d'outil (SMED/OTED/NED) fait partie de cette boîte à outils.

La TPM s'appuie sur un indicateur de rendement global (NF E60-182, 2002) pour quantifier la performance du système. Il s'agit du TRG (Taux de Rendement Global) qui correspond au temps passé à produire des pièces conformes sur la capacité totale disponible. Il s'agit du produit des trois facteurs suivants :

- taux de fonctionnement (temps de fonctionnement de la machine par rapport à sa capacité, moins les pertes dues aux pannes, aux arrêts et aux changements d'outils) ;
- taux d'allure (temps de fonctionnement moins les micro-arrêts, la marche à vide et la sous-vitesse) ;
- taux de bons produits (produits défectueux à réparer et mauvaise production au démarrage).

Un des piliers du TPM est la maintenance autonome, qui correspond à la maintenance de premier niveau (entretien courant) de la machine directement réalisée par l'opérateur de cette machine. Sept étapes sont codifiées dans la maintenance autonome, qui en font un outil applicable directement :

- nettoyage / inspection ;
- mesures contre les sources de salissure et pour faciliter les accès difficiles ;
- établissement des standards de nettoyage et de graissage ;
- inspection générale ;
- inspection autonome ;
- maîtrise du maintien en état ;
- approfondissement de la gestion autonome.

Enfin, la TPM est centrée sur le concept d'activités de groupe où tous participent. Les thèmes travaillés doivent être choisis, mais si la TPM propose des idées, aucun outil ne permet de définir comment ce choix peut être réalisé. Trois outils sont indissociables de ces activités de groupe : le panneau d'affichage, la réunion et la leçon ponctuelle.

2.3.2.4 Une démarche centrée sur les évolutions radicales : le Business Process Reengineering

Le Business Process Reengineering (BPR) vient des USA. Il est devenu la démarche phare des années 1990, après la publication du livre de M. Hammer et J. Champy (1993). Outre ses qualités intrinsèques, le succès du BPR vient aussi du fait qu'il était en rupture avec l'existant, venu pour l'essentiel du Japon (JIT, Kaizen, 5S, TPM, Kanban, poka-yoke) et permettait de lancer une nouvelle dynamique chez les consultants en entreprise.

Le BPR est présenté comme une démarche destinée à revoir en profondeur le mode de fonctionnement de l'entreprise et à restructurer de manière radicale ses processus. Le but du BPR est de repenser l'ancien processus, au lieu d'essayer de le réparer et de l'optimiser. Pour être le plus performant possible, le nouveau processus doit être pensé pour lui-même, sans se préoccuper des services fonctionnels qu'il traverse. On évite ainsi qu'une tâche similaire soit exécutée dans deux services différents (typiquement, les saisies d'une même information). Le BPR s'appuie sur des diagrammes de flux et des modèles graphiques de représentation des processus. Ces outils permettent de mettre en évidence les défauts dans l'organisation et les traitements redondants ou anormalement lents.

Les changements dus au re-engineering portent sur l'élimination du travail redondant et la rupture des barrières d'organisation. Actuellement, le BPR a été repris par les informaticiens. Il constitue souvent la première phase d'un projet de mise en place d'un Système d'Information ou d'un workflow.

2.3.2.4.1 Les principes fondamentaux du BPR

Sept principes permettent de résumer les aspects fondamentaux :

- organiser depuis les finalités du processus (le produit, le client), et non à partir des tâches ;
- placer les gens au bon endroit : seules les personnes réellement impliquées dans le processus doivent y travailler. Cela leur donnera plus d'autonomie, évitera de coordonner plusieurs équipes inutilement, et augmentera la réactivité ;
- traiter les ressources éparpillées comme si elles étaient centralisées, ce qui est désormais possible grâce aux systèmes d'information : on donne plus d'autonomie aux diverses équipes, tout en gardant le contrôle sur l'ensemble ;
- paralléliser au maximum les activités qui peuvent l'être : on peut ainsi réduire les délais et les rebuts ;
- prendre la décision là où se fait le travail pour accroître la réactivité ;
- prendre l'information à la source : on ne la rentrera qu'une seule fois dans les bases de données, réduisant ainsi les erreurs et les doublons ;
- faire traiter l'information par ceux qui la collectent : on diminue ainsi le nombre de personnes qui la traite et les risques d'erreurs.

2.3.2.4.2 La démarche BPR

Elle s'articule en cinq étapes qui sont :

Se donner des objectifs À partir d'un état des lieux, la direction doit se donner des objectifs (préférentiellement quantitatifs, selon des indicateurs choisis), et passer le message à l'ensemble des employés. Le message doit s'articuler en deux points : la nécessité de changer, et l'état visé des processus et de l'organisation de l'entreprise, une fois le changement effectué. La communication est un élément primordial dans l'application de la méthode.

Identifier le processus à reconfigurer Le BPR, même s'il vise un changement radical, doit rester modeste. Il propose différentes questions qui permettent de localiser le processus à changer : lequel est le plus problématique ? Lequel a le plus grand impact ? Le processus est-il obsolète ? Évaluer les éléments favorisant la reconfiguration : on doit savoir si les Ressources Humaines, les technologies de l'information, l'organisation, la culture de l'entreprise sont favorables au changement. Une bonne évaluation de ces facteurs aura un impact significatif sur la réussite du projet de reconfiguration.

Comprendre le processus actuel Le processus actuel doit être compris et diagnostiqué (avantages, inconvénients, résultats, performances), et plus particulièrement si on vise une amélioration technologique du processus et non un changement pur et simple.

Concevoir le nouveau processus On ne se sert que des principes fondamentaux de la méthode, et peut-être des retours d'expériences des autres cas de BPR.

Mettre en œuvre le nouveau processus Dans cette étape, les dirigeants détiennent un rôle essentiel de communication et d'implication du personnel. De plus, on doit vérifier que le projet de BPR a atteint ses objectifs, en comparant les objectifs initiaux avec les réalisations.

2.3.2.4.3 Quelques outils efficaces pour le BPR Quatre outils sont souvent associés au BPR afin de supporter la démarche :

La « pensée inductive » C'est la recherche de problèmes et solutions potentielles. Elle doit faire intervenir tous les acteurs.

Les diagrammes de flux C'est le seul outil utilisé dans 100 % des cas. Il sert à réaliser un diagnostic des processus et à fixer les objectifs en termes de flux.

Les jalons Poser des jalons doit permettre de comparer dans le temps les résultats et les avancées obtenus, ou même parfois comparer le déroulement du changement à d'autres expériences écrites.

Les simulations Certains programmes aident à comprendre le processus actuel, et aussi à imaginer le fonctionnement du prochain.

2.3.3 Synthèse sur l'amélioration de systèmes industriels

L'aspect humain est primordial dans toutes ces démarches d'amélioration. Il peut être vu au travers de l'implication de la direction, d'une part, et de l'adhésion de tous, d'autre part. Sans la prise en compte de ce facteur humain, toute démarche d'amélioration est vouée à l'échec.

2.3.3.1 L'implication de la direction : première condition nécessaire de succès

Il s'agit d'un préalable essentiel. On retrouve cette même exigence affirmée dans la norme ISO 9000 version 2000, qui consacre le chapitre 5 à la responsabilité de la direction. De multiples sondages et enquêtes font ressortir que le succès ou l'échec de la mise en œuvre d'une démarche d'amélioration résulte de l'implication ou de l'absence d'implication de la direction. Cet engagement doit se manifester concrètement dans les faits (par exemple, commencer à améliorer ses propres processus) et ne pas se limiter à quelques exhortations faites lors de grands-messes. De plus, cet engagement doit perdurer

dans le temps. Une démarche de progrès répond nécessairement à un réel besoin d'évolution et doit amener des changements profonds et progressifs.

L'engagement de la direction sous-tend qu'elle :

- ait identifié ses orientations stratégiques, les buts et objectifs à atteindre ;
- soit convaincue elle-même de la nécessité de lancer une démarche d'amélioration ; il est en effet rare que l'ensemble de la direction soit complètement en phase ;
- soit capable de faire partager cette nécessité et ces objectifs ;
- ait pris conscience des implications que cela représente pour elle et pour l'entreprise en termes de priorités, de moyens nécessaires, de temps et d'énergie à y consacrer.

2.3.3.2 Adhésion et participation active de l'ensemble du personnel : seconde condition nécessaire de succès

Ces démarches sont assez lourdes à mettre en place. Elles nécessitent toutes une forte adhésion et une forte implication de l'ensemble du personnel, sans lequel le succès de la démarche est compromis. Chacun doit s'exprimer et participer. Or, force est de constater que le changement provoque des résistances de la part des individus : réticence à changer ses habitudes, refus du changement, peur de l'avenir, etc. En contrepartie, les efforts et résultats doivent être reconnus.

Au-delà de l'amélioration des performances opérationnelles, l'implication forte de l'ensemble du personnel provoque des changements culturels importants. Non seulement les habitudes de travail sont modifiées, mais les comportements aussi. L'esprit d'équipe et le sentiment d'appartenance à l'entreprise sont renforcés. Le personnel devient plus autonome et responsable. Il s'ensuit généralement une décentralisation des décisions, une clarification et une modification des rôles, notamment de la maîtrise intermédiaire et une réduction des barrières hiérarchiques.

La notion « d'équipe autonome » apparaît dans le vocabulaire de l'entreprise. Il s'agit de mettre en place des équipes de travail pour s'occuper de façon autonome d'un processus ou d'un segment de processus. Le groupe est responsable de sa gestion, de ses opérations et de ses résultats, ce qui augmente le niveau d'initiative des employés et la flexibilité de l'organisation.

2.3.3.3 Les instruments existants pour l'amélioration des systèmes industriels

Afin de compléter cet état de l'art sur les supports de l'amélioration des systèmes industriels, nous allons maintenant faire un tour d'horizon des instruments existants avec la figure 2.4. Malgré notre souci d'exhaustivité, il est illusoire de vouloir tous les réunir, étant donné la diversité existante.

Cependant, notre souci ici a été de différencier les instruments d'analyse des instruments d'actions, ainsi que les instruments orientés vers les aspects ressources et ceux orientés vers les aspects fonctionnels.

Un instrument remarquable apparaît au centre de cette figure, permettant l'analyse et l'action des aspects ressources et fonctionnels. Il s'agit de la simulation de flux. Cet instrument permet effectivement d'élaborer un modèle pour analyser une situation donnée mais aussi représenter le modèle d'un système futur. En outre, il permet d'évaluer le comportement dynamique de ces modèles. Enfin, il intègre nativement les aspects flux et ressources, voir décisionnel sur le court terme.

	Fonctionnel	Fonctionnel et Ressources	Ressources
Analyse	<p>analyse de la valeur process mapping value stream mapping CDF</p>	<p>5 pourquoi, QOQOCP AMDEC audit benchmarking carte de contrôle cercle de qualité diagnostic d'anomalies diagnostic état machine diagramme de concentration des défauts diagramme de décision diagramme de Pareto (ABC) diagramme de relation diagramme des affinités liste des sources du muda mesure des temps feuille de relevés graphiques diagramme de dispersion analyses factorielles</p>	<p>diagramme en arêtes de poisson (Ishikawa), 5M mesure de la capabilité simogramme test de répétabilité et reproductibilité outils du fiabiliste (MTTF, MTBF, tolérance aux pannes...)</p>
Analyse et action	<p>brown paper logigramme</p>	<p>simulation</p>	
Action	<p>règles d'échantillonnage SPC/MSP</p>	<p>5 S brainstorming leçon ponctuelle outils de communication visuelle / affichage plan d'expérience vote pondéré modularisation standardisation, DFX réorganisation par îlots / réimplantation d'ateliers technologie de groupes</p>	<p>NED/OTED/SMED poka yoké fiches de poste</p>

Fig. 2.4 – Les instruments pour l'amélioration.

2.3.3.4 Un constat de carence

En conclusion, l'ensemble des supports d'amélioration des systèmes socio-techniques donnent les moyens d'améliorer des processus. Cependant, ces outils pèchent à identifier les endroits sur lesquels l'effort doit être porté. *A contrario*, la modélisation d'entreprise aide à beaucoup mieux caractériser les systèmes en développant notamment ses multiples points de vue. Au final, nous constatons une carence sur deux points. D'une part, aucun instrument ne permet de détecter les points sur lesquels l'amélioration doit porter. D'autre part, la mise en œuvre n'est pas instrumentée. Nous proposons donc de répondre à ces deux besoins dans le prochain chapitre.

Chapitre 3

Proposition d'une grille d'analyse/action instrumentée pour faire le lien entre l'étape de diagnostic et l'étape de traitement dans une méthode d'amélioration d'un système industriel

Dans ce chapitre, nous utilisons une méthode pour diagnostiquer et traiter les dysfonctionnements d'un système industriel, issue de l'état de l'art présenté précédemment. Cette méthode s'appuie sur deux phases : le diagnostic et le traitement. Cette méthode est itérative en revenant sur la phase de diagnostic en fonction de diverses évolutions qui peuvent se produire. Après avoir présenté cette méthode, nous proposerons le cœur de notre apport : une grille d'analyse du système et de définition des actions à mener, avec les instruments supports pour l'analyse et l'action.

Cette méthode et l'utilisation de cette grille ont surtout pour but de s'appliquer lorsque les causes de dysfonctionnement ne sont pas évidentes. En outre, la partie de modélisation de l'étape du diagnostic n'a pas pour objectif d'établir une modélisation exhaustive extrêmement détaillée du système considéré. Dans un premier temps, des modélisations simples seront menées afin de pouvoir réaliser rapidement une première phase d'analyse. Dans le cas où des points d'ombre nécessiteraient d'être éclairés pour améliorer l'analyse, la modélisation de ces points précis sera réalisée à un niveau plus détaillé. L'objectif n'est pas de modéliser pour avoir des modèles, mais de modéliser pour conduire un diagnostic et détecter les dysfonctionnements.

3.1 Présentation générale de la méthode

Afin de présenter cette méthode, nous allons établir une analogie avec le rôle du médecin généraliste dans le système de santé humaine.

« Le médecin assure la résolution des problèmes de santé et le maintien de la santé publique. Pour faire son diagnostic, le généraliste contrôle les fonctions significatives en examinant [le patient] avec méthode (le pouls, la respiration, la tension, etc). S'il n'est pas sûr de son diagnostic, il ordonne des examens complémentaires (tels que les radiographies, les analyses de sang...), ou il envoie son patient à un confrère spécialisé. Lorsqu'il est sûr de la pathologie, le médecin effectue les soins nécessaires et prescrit un traitement qui prend en compte les avantages et les inconvénients. » (source : <http://www.chru-lille.fr/>)

Si nous changeons le système concerné en passant du corps humain à un système industriel, nous pouvons rester dans le même ordre d'idée. En effet, la personne chargée de résoudre un des problèmes de l'entreprise (qui peut être suivant le cas, un chef de projet, un consultant interne ou externe à l'entreprise, un chef de service...) établit tout d'abord un diagnostic du système en utilisant une méthode. Si elle n'est pas sûre de son diagnostic, elle réalise - ou fait réaliser par un spécialiste - des examens complémentaires. Lorsque le diagnostic est établi avec certitude, le traitement est prescrit - appelé plan d'actions - et les soins sont réalisés : la conduite des actions d'amélioration.

La méthode que nous proposons comporte donc deux phases : d'abord un diagnostic, puis un traitement, comme présenté sur la figure 3.1. Cette méthode n'est autre qu'une version allégée de la démarche PETRA (cf. 2.2.2). En effet, nous pouvons établir une correspondance directe entre notre phase d'analyse et la phase C de PETRA (analyse de l'existant du domaine d'étude), entre notre priorisation des actions et la phase D (choix de l'opportunité) ou encore entre notre phase de traitement et les phases E et F (élaboration conceptuelle de la nouvelle organisation et mise en œuvre).

3.1.1 Phase de diagnostic

La phase de diagnostic part du système industriel considéré pour aboutir à la liste des actions potentielles. Pour ce faire, un modèle du système réel doit être réalisé (étape de modélisation), puis ce modèle doit être analysé. Le résultat de cette analyse correspond à une liste d'actions non priorisées.

3.1.1.1 Étape de modélisation

Afin de préciser l'étape de modélisation du système, nous devons nous placer dans un cadre de référence. Nous choisissons de nous placer dans le cadre de l'architecture GERAM. Ainsi, nous devons nous positionner sur chacune de ses dimensions.

Pour la dimension « cycle de vie », nous considérons la partie du cycle de vie du système qui concerne sa vie opérationnelle, en effet, nous nous intéressons aux systèmes qui ne sont pas en cours de conception, ni de démantèlement.

Pour la dimension de l'instanciation, nous nous positionnons sur le cas générique, étant donné que nous proposons cette méthode dans le cas d'un système industriel sans plus de précision.

Enfin, en ce qui concerne la dimension des vues, nous retenons les quatre du cadre de référence : fonctionnelle, informationnelle, ressources et organisationnelle. Cependant, nous apportons une précision sur le point de vue organisationnel en le scindant en deux aspects : statique d'une part (organisationnel au sens strict) et dynamique d'autre part (que nous appellerons décisionnel).

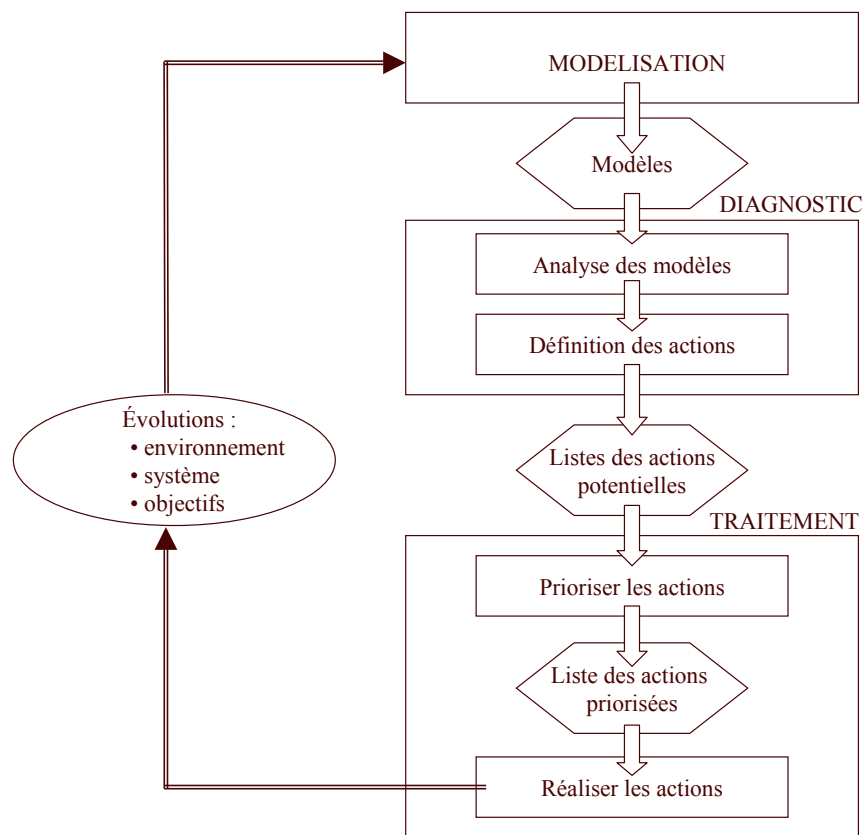


Fig. 3.1 – Méthode proposée.

Pour chacun des points de vue, nous retenons un modèle qui permet d'instrumenter cette étape.

Ainsi, pour le point de vue fonctionnel, nous proposons d'utiliser un modèle à base d'actigrammes. Pour le point de vue organisationnel : les organigrammes ; pour le décisionnel : la grille GRAI ; pour l'informationnel : entités-associations ou diagramme de classe ; et enfin pour les ressources : description hiérarchique. Bien entendu, tous les autres modèles présentés au chapitre précédent pourraient convenir ; il ne s'agit pas ici de discuter de la pertinence de telle ou telle modélisation.

C'est également lors de cette étape qu'un bilan des indicateurs de performances du système considéré doit être réalisé. Nous proposons de nous baser à un premier niveau sur les indicateurs du modèle SCOR. En effet, ceux-ci ont été définis pour constituer une vision de système entreprise relativement complète. Ils développent les trois dimensions coûts, délais, qualité, à la fois du point de vue des clients (niveau de service, cycle industriel, réactivité) et des financiers de l'entreprise (structure de coûts, coût de garantie, etc).

L'étape de modélisation est terminée lorsque chacun des points de vue considérés est modélisé, au moins à un premier niveau de « macro-modélisation ».

3.1.1.2 Étape d'analyse

Une fois les modèles obtenus pour chacun des points de vue, ces modèles doivent être analysés. Si nous reprenons l'analogie avec le médecin généraliste, la phase de modélisation n'est pas nécessaire car le modèle du corps humain générique auquel il est fait implicitement référence est connu du praticien. Il peut néanmoins, au fur et à mesure des analyses menées, établir un modèle de son patient légèrement différent du modèle générique : il s'agit en quelque sorte du dossier médical.

Cette étape d'analyse va être instrumentée grâce à une grille d'analyse. Cette grille d'analyse est bâtie à partir des points de vues de la modélisation. Elle correspond à la recherche des dysfonctionnements et est basée sur des questions concernant les inducteurs de performance par rapport aux indicateurs cités précédemment.

En mettant en exergue des inducteurs de performance, l'analyse aide donc à définir des actions à réaliser. À la fin de la phase de diagnostic, nous obtenons la liste des actions qui peuvent être accomplies et qui auront un effet sur les indicateurs de performance retenus. Les actions qui n'agissent pas sur les indicateurs de performance auront donc été filtrées à ce stade.

3.1.2 Phase de traitement

La phase de traitement va avoir pour objet de partir d'une liste d'actions possibles ayant *a priori* un effet sur les indicateurs de performance et de mener opérationnellement certaines d'entre elles. Pour ce faire, deux étapes vont être nécessaires. D'une part, prioriser les actions dans le temps. D'autre part, conduire les actions.

3.1.2.1 Étape de priorisation des actions

La priorisation des étapes permet de définir les actions qui doivent être engagées rapidement, celles qui doivent l'être plus tard, et celles qui ne devront pas l'être.

Nous proposons d'instrumenter cette étape au moyen de la matrice enjeux - accessibilité. D'un côté, la notion d'enjeux permet de prendre en compte les gains potentiels sur les indicateurs de performance. D'un autre côté, la notion d'accessibilité permet de différencier les actions « réalisables sans grande difficulté » de celles qui sont « utopiques ».

Nous proposons également d'utiliser, pour les cas les plus complexes, l'analyse FFMO (Forces, Faiblesses, Menaces, Opportunités - SWOT en anglais pour Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats).

Ces deux types d'analyses permettent de positionner les tâches à réaliser par rapport à la stratégie d'évolution du système. En outre, la phase d'analyse aura aidé à construire les liens de causalité entre actions / inducteurs de performance / indicateurs de performance. On peut donc positionner l'enjeu de chaque action par rapport au niveau de performance attendu d'après les objectifs stratégiques définis. Nous devons remarquer deux points. D'une part, des actions peuvent avoir des liens de précédence entre elles. D'autre part, les enjeux des actions ne sont pas linéaires (plusieurs actions combinées peuvent avoir un enjeu global plus important que la somme des enjeux pris séparément).

Le résultat de cette étape est une liste des actions priorisées dans le temps. Certaines de ces actions peuvent être positionnées sur un horizon temporel tellement éloigné qu'elles ne seront jamais réalisées, ce qui est parfaitement normal.

3.1.2.2 Étape de conduite des actions

Une fois les actions priorisées, il ne reste plus qu'une seule chose à faire : réaliser celles qui sont prioritaires. La réalisation va donc recouvrir la partie de la démarche où le système va évoluer. L'objectif est bien évidemment d'aller dans le sens de l'amélioration des niveaux de performance du système.

Nous proposons d'instrumenter cette étape grâce aux supports de l'amélioration des systèmes industriels.

3.1.3 Itération de la méthode en fonction des évolutions

Cette démarche n'est pas conçue pour être utilisée en un seul passage. En effet, au cours d'un projet d'amélioration, le système va évoluer puisque c'est justement le but du projet. Du fait de la complexité des systèmes mis en jeu, il est difficile de prévoir l'ensemble des évolutions induites par une modification. Ainsi, à partir d'un certain avancement du projet, une nouvelle modélisation doit être réalisée afin de vérifier la convergence des modifications vers la cible fixée. En outre, l'environnement du système et la stratégie à suivre sont susceptibles d'évoluer, plus ou moins notablement. Ainsi, certaines actions abandonnées du fait de leur faible accessibilité peuvent redevenir d'actualité, alors que d'autres très accessibles au départ vont se révéler inatteignables dans le nouvel environnement. Dans le même ordre d'idée, l'évolution de l'environnement peut se traduire non pas par un changement de l'accessibilité, mais plutôt par une modification des modèles, donc une analyse à reprendre (en écart et non en absolu) ou une liste d'actions à modifier. Enfin, les objectifs globaux du système considéré peuvent être modifiés. À ce moment là, le plan d'actions doit être revu pour correspondre aux nouveaux objectifs à satisfaire.

3.2 La grille instrumentée : le lien nécessaire entre le diagnostic et le traitement

La figure 3.2 représente la grille d'analyse que nous proposons pour réaliser l'identification des dysfonctionnements à traiter. Nous pouvons remarquer que les lignes et les colonnes correspondent aux points de vue choisis pour la réalisation du modèle d'entreprise. Deux types d'analyses sont à considérer. D'une part, les analyses sur les points de vue, qui correspondent aux intersections de lignes et colonnes aux libellés identiques, évalueront la cohérence du modèle élaboré pour chacun des points de vue. D'autre part, les analyses inter-points de vue, correspondant aux intersections de lignes et colonnes aux libellés différents, évalueront la cohérence entre les modèles des deux points de vue.

	Système physique		Système de pilotage		Système d'information
	Fonctionnel	Ressource	Organisationnel	Décisionnel	Informationnel
Fonctionnel	1	6	7	9	12
Ressource		2	8	10	
Organisationnel			3	11	
Décisionnel				4	
Informationnel					5

FIG. 3.2 – Grille d'analyse de la modélisation du système étudié.

Pour chacune des intersections, l'analyse va consister en une succession de questions (une sorte de check-list) sur les modèles pour identifier les dysfonctionnements. C'est ce que nous appellerons la démarche d'analyse et que nous présenterons en 3.2.1.

La réalisation de ces analyses et les traitements qui s'ensuivent vont s'appuyer sur des instruments. Nous hériterons alors du courant scientifique de l'amélioration des systèmes industriels. C'est ce que nous appellerons l'instrumentation de la grille, que nous présenterons en 3.2.2.

3.2.1 La démarche d'analyse pour l'identification des dysfonctionnements

Pour nous repérer lors de la présentation de cette démarche d'analyse, nous ferons référence par un numéro à la case correspondante de la grille d'analyse (cf. 3.2). Cette numérotation correspond en outre à l'ordre de réalisation de cette démarche. Nous proposons d'analyser d'abord les points de vue, puis ensuite les inter-points de vue, à chaque fois en partant du système physique, en poursuivant par le système de pilotage et en terminant par le système d'information. Analyser les points de vue avant les inter-points de vue correspond à une analyse de complexité croissante. En effet, il est inutile de rechercher les dysfonctionnements correspondant à la relation entre deux points de vue si les

dysfonctionnements de chacun des points de vue ne sont pas connus. Ensuite, l'ordre de réalisation selon les sous-systèmes physique-pilotage-information est motivé par la nécessité d'analyser d'abord le système qui doit être piloté (le système physique) avant de voir comment il est piloté (le système de pilotage). De même, il est nécessaire de connaître le système à piloter et le système de pilotage pour définir comment le lien est réalisé au travers du système d'information.

Le point de vue fonctionnel (1) est bâti à partir d'actigrammes qui décomposent des activités traversées par des flux. L'analyse porte donc naturellement sur ces deux dimensions. Premièrement, une réflexion sur la valeur ajoutée de chaque flux doit être menée. Il s'agit d'étudier les performances (au sens des indicateurs de performance choisis) par type d'entrées et de sorties de chacune des activités de la vue fonctionnelle. Deuxièmement, une autre analyse est à réaliser sur la valeur ajoutée de chaque activité (étape d'un ou plusieurs flux). Nous pouvons retrouver ici un des principes du BPR qui consiste à paralléliser au maximum les activités qui peuvent l'être.

L'analyse du point de vue ressources (2) correspond à la seule caractéristique intrinsèque d'une ressource : sa disponibilité. Il va s'agir ici de répondre à la question : une ressource est-elle capable de faire une tâche ou un groupe de tâches, de fonctionner pendant un jour, un an... sans défaillance. La modélisation par décomposition hiérarchique proposée permet de définir sur quel périmètre porte l'analyse de fiabilité à proprement parler.

L'analyse du point de vue organisationnel (3) correspond à l'analyse de la cohérence du modèle organisationnel, celui-ci étant un ensemble d'unités organisationnelles inter-reliées. Par exemple, une unité organisationnelle dépendant à la fois de deux unités organisationnelles supérieures sans coordination entre les deux, n'est pas un système organisationnel cohérent.

L'analyse du point de vue décisionnel (4) correspond à la cohérence du modèle décisionnel formulé, notamment pour la grille GRAI.

Enfin, le dernier point de vue à analyser est informationnel (5). Nous considérons l'information comme un support aux autres points de vue. L'analyse peut alors être menée sur :

- la fiabilité de l'information ;
- la cohérence entre les différentes occurrences d'une même information ;
- et la disponibilité de l'information (actualisation et mise à disposition).

La notion de fiabilité de l'information renvoie au fait qu'une information donnée a un sens en accord avec celui qu'elle devrait avoir. Nous pouvons prendre l'exemple d'un stock ayant une certaine valeur dans le système d'information, alors que l'emplacement de stockage est vide. La cohérence entre les différentes occurrences fait référence à la problématique d'unicité de l'information afin d'éviter les incohérences. Par exemple, l'information sur un stock est présente dans deux systèmes d'information différents (gestion de stock et comptable par exemple) et la valeur n'est pas la même. Enfin, la disponibilité de l'information est liée à la problématique de sa mise à disposition (récupérer l'information et la transférer) ainsi que de son actualisation. L'information sur un niveau de stock n'a aucune valeur pour un planificateur de production si elle date de plusieurs jours ou si il ne peut pas y avoir accès aisément. Nous retrouvons ici plusieurs principes du BPR sur la récupération de l'information à la source, sur son unicité ou encore sur le traitement de l'information par le collecteur.

L'analyse fonctionnel/ressource (6) recouvre plusieurs questions. Premièrement, nous allons considérer l'état statique du système en analysant les compétences (dans le cas des ressources humaines) ou les aptitudes (dans le cas des ressources techniques : machines et logiciels) en fonction de celles

qui sont requises par les différentes activités les traversant. Deuxièmement, nous nous intéressons au caractère dynamique du système en déterminant si les ressources sont flexibles et réactives par rapport aux flux qui les traversent. Une ressource est dite flexible si elle peut effectuer plusieurs types d'activités différentes. Une ressource est dite réactive si elle peut passer d'un type d'activité à un autre de façon rapide. Troisièmement, l'organisation des flux entre les différentes ressources est-elle réalisée correctement ? Il s'agit là d'analyser les différentes manières d'organiser des processus physiques et de choisir celle qui est la plus adaptée. Enfin, la dernière analyse à mener concerne l'adaptation des flux aux ressources requises. En effet, un inducteur de performance peut être de concevoir/reconcevoir les produits soit en les standardisant, modularisant... soit en les adaptant au processus de production.

L'analyse fonctionnel/organisationnel (7) pose le problème de la cohérence entre les processus fonctionnels et les unités organisationnelles traversées. Tout d'abord, il doit être sain qu'une unité organisationnelle soit mise en jeu dans un processus fonctionnel donné. En outre, lorsqu'un processus fonctionnel traverse plusieurs unités organisationnelles, les interfaces sont-elles claires et affichées ?

L'analyse ressources/organisationnel (8) pose la question de l'adéquation de la charge de gestion de l'unité organisationnelle avec la capacité disponible pour effectuer cette tâche de gestion. En effet, certaines ressources sont liées pour tout ou partie de leur charge de la gestion d'un système industriel (flux, unité organisationnelle, etc). Une autre analyse pertinente concerne la cohérence de l'affectation des ressources avec la décomposition organisationnelle. On peut illustrer cette analyse par le cas d'une usine qui aurait plusieurs ateliers et dont l'un des ateliers serait piloté par une autre usine.

L'analyse fonctionnel/décisionnel (9) permet de s'assurer que les centres de décision nécessaires et suffisants existent pour gérer l'ensemble des flux et des activités d'un modèle fonctionnel, pour tous les niveaux de prise de décision adaptée (opérationnel, tactique, stratégique).

Nous retrouvons une question similaire lors de l'analyse ressource/décisionnel (10) afin de vérifier que les centres de décisions nécessaires et suffisants existent pour gérer l'ensemble des ressources. Cette analyse touche également à l'adéquation charge/capacité des ressources et le pilotage de ce ratio par le centre de décision adéquat. Enfin, nous devons également nous intéresser à la cohérence des centres de décisions du point de vue des ressources gérées. En effet, il est important que les ressources pilotées par un centre de décision soient du même niveau dans la décomposition hiérarchique des ressources. Nous pouvons imaginer la difficulté d'un centre de décision à gérer simultanément la planification d'un ensemble d'unités de production d'un réseau logistique et l'ordonnancement d'un atelier regroupant quelques machines et quelques personnes. Il est sain qu'un centre de décision pilote l'ensemble des ressources de son périmètre correspondant à un niveau donné de la hiérarchie des ressources.

L'analyse décisionnel/organisationnel (11) requiert une vérification de la cohérence entre les centres de décisions et les unités organisationnelles. Il est important que la grille GRAI puisse être découpée en zones, chacune étant associée à une unité organisationnelle donnée. Lors de cette analyse, il est important également de vérifier qu'une unité organisationnelle n'ait pas la responsabilité d'un demi centre de décision (ne pouvant agir que sur une partie des inducteurs de performance) et qu'une autre unité organisationnelle ait l'autre moitié.

Enfin, pour terminer le parcours de cette grille, nous devons procéder à l'analyse du point de vue informationnel (12) avec l'ensemble des autres points de vue. L'information étant un support pour les autres points de vue, l'analyse va porter ici sur l'identification des informations nécessaires.

Une fois ces analyses menées, des pistes d'amélioration peuvent être identifiées. Ces pistes doivent être alors évaluées en termes d'accessibilité et d'enjeux, afin de savoir si la mise en œuvre des actions appropriées sera réalisée.

L'analyse aurait pu être poussée jusqu'à s'interroger sur les intersections entre trois ou quatre points de vue. Cela rajoute bien évidemment de la complexité et au vu de notre expérience, cela n'est pas nécessaire. Notre proposition de grille s'arrête donc à l'analyse des interactions entre deux points de vues.

3.2.2 Instrumentation de l'analyse et de la mise en œuvre des améliorations

Afin de réaliser les analyses que nous venons d'exposer, puis de mettre en œuvre les conclusions, nous proposons maintenant d'instrumenter la grille (cf. 3.3). Chaque case (ou groupe de cases en cas de regroupement) sera instrumentée pour l'analyse d'une part et pour l'action d'autre part.

Historiquement, c'est principalement le système physique qui a été travaillé, puisqu'il correspond à l'assise de l'activité d'un système industriel. Ainsi, comme nous l'avons vu dans l'état de l'art présenté au chapitre précédent, plusieurs démarches et de nombreux instruments ont été créés pour les points de vue fonctionnel et ressource.

Plus récemment, les systèmes de pilotage et d'information ont été plus travaillés afin d'améliorer la performance globale du système. Les outils sont donc moins largement diffusés du fait de cette relative jeunesse.

Nous allons reprendre la grille case par case pour identifier les instruments d'analyse et d'action.

Concernant le point de vue fonctionnel (1), les instruments d'analyse sont ceux qui ont été présentés au tableau 2.4 pour la colonne « fonctionnel ». Les instruments d'action associés sont présentés dans ce même tableau. Nous pouvons compléter cette instrumentation par la démarche BPR, car comme son nom l'indique, elle a vocation à être fortement axée sur le point de vue fonctionnel.

Pour le point de vue ressource (2), de la même façon que précédemment, le tableau 2.4 fournit les différents instruments associés. Nous y ajoutons la démarche TPM en raison de sa forte connexion avec les préoccupations de cette case de la grille.

Le point de vue organisationnel (3) est instrumenté grâce au domaine de la gestion des organisations. Cependant, nous estimons nos compétences limitées sur ces aspects et donc notre proposition est certainement partielle sur ce point. Nous instrumentons néanmoins l'analyse menée à cette case par une réflexion sur le lien entre les différentes unités organisationnelles de l'organigramme, leur mode de management et comment en est assurée la direction. La mise en pratique industrielle se fera fréquemment avec des spécialistes de ces questions que l'on retrouve le plus souvent dans les fonctions de Ressources Humaines. En revanche, la mise en œuvre se fera soit par une reconception partielle de la structure organisationnelle (et de son modèle, l'organigramme), soit par une reconception totale.

Le point de vue décisionnel (4) est instrumenté nativement par le modèle GRAI. En effet, celui-ci dispose d'un ensemble de règles pour s'assurer de la cohérence intrinsèque de la grille GRAI et ce sont donc ces onze règles que nous utilisons pour mener cette analyse. La mise en œuvre se fera - de même que précédemment - par une reconception soit partielle, soit totale de la structure décisionnelle.

	Système physique			Système de pilotage		Système d'information
	Fonctionnel	Ressources	Organisationnel	Décisionnel	Informationnel	
Fonctionnel	Instruments d'analyse du point de vue fonctionnel Instruments d'actions sur le point de vue fonctionnel BPR	Instruments d'analyse fonctionnel-ressource, Flex. & réact. aptitudes & compétences, Orga flux Instruments d'action fonctionnel-ressources TQM / Kaizen Lean / Kaizen	Analyse cohérence des 2 modèles + analyse interfaces Reconception totale ou partielle de l'organisation	Analyse cohérence des 2 modèles + analyse interfaces Reconception totale ou partielle du réseau décisionnel	Analyse des informations requises via QOQCP	
Ressources	Instruments d'action sur le point de vue ressources TPM	Instruments d'analyse des ressources	Analyse cohérence des 2 modèles + analyse interfaces Reconception totale ou partielle de l'organisation	Analyse cohérence des 2 modèles + analyse interfaces Reconception totale ou partielle du réseau décisionnel		
Organisationnel			Outils d'analyses des organisations Reconception totale ou partielle de l'organisation	Analyse cohérence des 2 modèles + analyse interfaces Reconception totale ou partielle du réseau décisionnel		
Décisionnel				Règles GRAI Reconception totale ou partielle du réseau décisionnel	Reconception totale ou partielle du système d'information	
Informationnel					Cohérence, transfert, disponibilité et fiabilité des informations Instruments d'action du point de vue fonctionnel BPR	

FIG. 3.3 – Instrumentation de la grille pour l'analyse et l'action.

Le point de vue informationnel (5) est instrumenté pour l'analyse par des règles précisées par certains des modèles utilisés. Ainsi, un certain nombre de règles sont sous-jacentes au modèle Entités-Associations. Par exemple, un identifiant existe pour chaque entité. Cependant, la vérification de la cohérence du modèle dépend du sens donné. Des outils logiciels existent pour valider la cohérence d'un modèle, pour une sémantique définie.

Pour l'inter-point de vue fonctionnel-ressources (6), les instruments disponibles pour l'analyse sont en partie listés dans le tableau 2.4. Nous pouvons compléter cette liste en y ajoutant l'analyse de l'adéquation entre les compétences/aptitudes des ressources et celles requises par les flux les traversant. En outre, l'analyse de la flexibilité et de la réactivité des ressources en fonction des flux les traversant peut être menée. Bien qu'il n'y ait pas d'instrument à proprement parler, il suffit de vérifier si chaque type de ressource est flexible et réactif en fonction des contraintes de flux qui les traversent. Pour l'instrumentation de l'action, le tableau 2.4 établit une liste des supports existants auxquels nous ajoutons les démarches TQM / 6 Sigma et Lean / Kaizen. Elles permettent toutes de travailler sur cette relation entre les flux et les ressources. Le choix entre les différentes démarches possibles pourra se faire en lien avec le besoin exprimé (est-ce plutôt un problème de ressources ou plutôt un problème de flux ?), en fonction du type d'approche souhaitée (changement plutôt en douceur ou plutôt de façon rapide) ou encore en fonction de l'organisation générale de l'entreprise et de sa culture, comme le propose T. Siebenborn (2005).

Pour les inter-points de vue organisationnel-fonctionnel et organisationnel-ressources (7 et 8), il n'existe pas d'instruments *a priori* pour les analyser. Nous proposons une confrontation des deux modèles entre eux et par rapport aux questions de l'analyse. Pour l'inter-point de vue organisationnel-ressources (8), la tâche de gestion de l'unité organisationnelle peut être appréhendée au moyen d'une classique analyse charge/capacité. L'instrumentation de l'action sur ces deux cases se fait comme pour la case 3 par une reconception totale ou partielle de l'organisation. En ce qui concerne les actions liées à une mauvaise adéquation charge/capacité pour la gestion d'une unité organisationnelle, des actions peuvent être menées, comme la révision de la charge de gestion ou encore la modification de la capacité par un ajout de ressources. Les analyses et actions sur les cases 7 et 8 ne peuvent être entreprises que si les points de vue fonctionnels et ressources sont stabilisés, ce qui confirme l'ordre de réalisation proposé au début du chapitre.

Pour les inter-points de vue décisionnel-fonctionnel, décisionnel-ressources et décisionnel-organisationnel (9, 10 et 11), nous retrouvons les mêmes instruments d'analyse et d'action que ceux présentés précédemment pour les cases 7 et 8 : confrontation des deux modèles et des interfaces, et reconception totale ou partielle de réseau décisionnel.

Enfin, pour les inter-points de vue liés au point de vue informationnel (12), l'instrumentation de l'action est faite avec le QQQQCP (Qui ? Quand ? Où ? Quoi ? Comment ? Pourquoi ?). En effet, cet instrument permet d'analyser les besoins en information des autres points de vue : « Qui utilise quelle l'information ? Où ? Comment ? Quand ? Pourquoi ? ». L'instrumentation de l'action va se traduire par une reconception totale ou partielle du système d'information.

À l'issue de l'utilisation de cette grille d'analyse, des dysfonctionnements ont dû apparaître. Des cibles doivent être proposées avec des supports pour réaliser la transition entre l'état actuel et cette cible.

3.3 Synthèse de notre apport

À la fin du chapitre précédent, nous concluons sur un constat de carence dans le diagnostic et l'amélioration de systèmes socio-techniques. En effet, un outil permettant de définir quels sont les points à améliorer et quels sont les supports pour mettre en œuvre cette amélioration n'existait pas.

Dans ce chapitre, nous avons proposé - pour les systèmes industriels - une grille d'analyse/action instrumentée partant des modèles d'entreprise avec les différents points de vue pour aboutir à une liste de dysfonctionnements et des instruments à utiliser afin d'arriver jusqu'à une cible définie.

L'exhaustivité de la check-list est, d'une part, basée sur la structure des modèles utilisés et leur confrontation. D'autre part, cette check-list hérite de l'expérience industrielle des partenaires du projet pour pouvoir critiquer les modèles. En revanche, si des modèles plus détaillés sont utilisés ou si un nouveau point de vue est à développer (environnemental par exemple), alors elle atteint ses limites.

Nous conjecturons que l'usage de cette grille peut être étendu à l'ensemble des systèmes socio-techniques, cependant, nous ne sommes pas en mesure de le prouver car nous ne l'avons pas appliqué aux systèmes socio-techniques qui ne sont pas des systèmes industriels. Une difficulté qui semble devoir être rencontrée, est la plus faible part relative aux aspects physiques en comparaison avec les systèmes industriels de production.

Chapitre 4

Exemple d'application de notre méthode sur le cas industriel étudié

Le contrôle qualité est une activité de service travaillant à la commande pour la production, car (1) il produit une information et non un bien matériel, et (2) sa charge ne peut pas être avancée (on ne peut pas faire l'analyse avant la production du médicament, alors que l'on peut produire le médicament avant sa vente et le stocker entre temps). L'opération de contrôle qualité est donc comprise entre deux dates jalons (réception de l'échantillon et date de besoin).

Étant donné que nous avons pour objectif d'améliorer l'ensemble du système « laboratoire de contrôle qualité » et que les actions à mener ne sont pas intuitives *a priori*, nous nous basons sur la méthode présentée précédemment afin de réaliser notre diagnostic et mettre en œuvre les actions appropriées.

Avant de démarrer la modélisation, nous allons définir les principaux points de vocabulaire liés aux laboratoires de contrôle qualité :

Autorisation de mise sur le marché (AMM) Il s'agit de l'agrément de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé (AFSAPS) pour la commercialisation d'un médicament en France. Cet agrément valide un dossier d'AMM où est précisée une série d'informations sur le produit et son procédé de fabrication. Ainsi, ce dossier définit la notion de taille de lot pharmaceutique qui est fixée pour le produit, ainsi que les procédures de contrôle.

Lot pharmaceutique Un lot pharmaceutique est l'ensemble d'une production où les entités constitutives forment un ensemble homogène. La taille de lot pharmaceutique est spécifiée dans le dossier d'AMM. Le procédé de fabrication est qualifié pour assurer l'homogénéité entre les éléments d'un même lot. Le but de cette structuration est d'assurer la traçabilité d'un produit donné sur toute la chaîne logistique (des producteurs de matières le composant jusqu'au consommateur final). De cette définition, découle le fait qu'une analyse est faite pour chacun des lots pharmaceutiques. Chaque lot pharmaceutique sera vu par le laboratoire de contrôle via un ou plusieurs échantillons moyens, mélanges élaborés à partir d'une ou plusieurs séries de prélèvements.

Lot de production Pour des contraintes logistiques, la production est organisée en campagnes, regroupant plusieurs lots pharmaceutiques. Nous appellerons lot de production une telle campagne dont la taille de lot est un multiple de la taille de lot pharmaceutique. Au cours de la campagne, le produit obtenu sera le même, mais pharmaceutiquement les entités élémentaires du lot ne seront pas homogènes d'un lot à l'autre, imposant une analyse par lot pharmaceutique.

Stade de production Lors de la production d'un lot pharmaceutique, nous pouvons identifier plusieurs étapes dans le procédé industriel. Ce sont ces étapes du process que nous nommerons stade de production. Par exemple, des stades de production classiques sont la granulation, la compression, l'enrobage, la mise en gélule pour les médicaments de forme sèche. Des analyses pourront être nécessaires sur un même lot pharmaceutique à différents stades de production.

Échantillon À tous les stades précisés dans le dossier d'AMM, un prélèvement sera effectué afin d'obtenir un échantillon à analyser. Ainsi, un échantillon peut être obtenu au début, au milieu et à la fin du lot pharmaceutique sur plusieurs stades de fabrication (granulation et enrobage par exemple) et pour tous les lots pharmaceutiques constituant un lot de production.

Mise en main Il s'agit de l'action de confier à un technicien un ou plusieurs échantillons, ainsi que la procédure de contrôle, associée pour qu'il détermine l'ensemble des paramètres attendus en réalisant le travail d'analyse physique, chimique ou biologique.

Analyse Une analyse est l'ensemble du travail effectué par les laboratoires de contrôle qualité (technicien(s) + machine(s)) suite à une mise en main. La mise en main pouvant regrouper plusieurs lots pharmaceutiques différents, une analyse pourra donc porter sur un ou plusieurs échantillons moyens. Une analyse peut porter sur un composé produit ou sur un composé approvisionné.

Détermination (ou test) Une analyse est composée d'une suite de déterminations ou tests. Une détermination permet d'obtenir un résultat sur une caractéristique physique, chimique ou biologique.

Routine Les analyses de routine sont les analyses liées à l'activité de production, i.e. le contrôle des composants, des in-process, des semi-finis et des produits finis. Aux analyses de routine s'opposent les analyses hors standards, qui regroupent les analyses de stabilité, les analyses liées à la transposition industrielle, les analyses des utilités (eau, air...), les analyses liées aux enquêtes qualité (réclamations, enquête procédé...), etc. Les délais associés aux analyses hors standard ne sont généralement pas spécifiés, ce qui permet au laboratoire de contrôle qualité de lisser sa charge sans perturber la production. La volumétrie de ces activités hors standard peut être très variable. Ainsi, la qualification d'une chaîne chromatographique se réalise une fois par an, alors que l'eau est analysée une fois par semaine et que la fréquence des enquêtes qualité suite à réclamation est par nature imprévisible.

Stabilité Les analyses de stabilité sont liées à la mise en stabilité du produit, i.e. une part du lot produit qui est placé dans les conditions de conservation prévues afin de caractériser son vieillissement. À certains moments de la vie du produit, des analyses sont pratiquées, ce sont les analyses de stabilité.

Transposition Les analyses de transposition sont des analyses liées au passage du produit du stade de développement au stade de production.

4.1 Le diagnostic du système

Le système que nous considérons - le laboratoire de contrôle qualité d'une usine de production pharmaceutique - est au début de notre étude un système que nous pouvons considérer comme « malade ». Le symptôme connu initialement concerne le délai de contrôle des analyses de routine. Celui-ci présentait deux caractéristiques jugées comme problématiques. D'une part, une variabilité était importante puisqu'il oscillait fortement autour d'une moyenne : moyenne de 16 jours et une oscillation entre 10 et 20 selon les mois. D'autre part, la moyenne située à 16 jours était considérée comme particulièrement élevée en regard du passé, du cas d'autres usines du groupe ainsi que d'entreprises concurrentes.

L'objectif initial était double : fiabiliser le délai puis le réduire. Pour atteindre ces deux objectifs, les actions à mettre en œuvre n'étaient pas évidentes *a priori* et donc nous proposons d'utiliser la grille présentée au chapitre précédent pour mener ce projet d'amélioration. L'indicateur de performance retenu par les initiateurs du projet est celui du temps de cycle analytique, mais nous y ajoutons l'indicateur de coût de fonctionnement du système, afin de pouvoir mesurer la pertinence de certaines actions en terme de gains économiques directs et non sur l'unique temps de cycle (gains économiques indirects via les réductions de stocks...). Étant donné que ce système fonctionnait (il remplissait son objectif de donner des résultats analytiques), il faut noter que tout n'était pas à refaire, donc tous les points de la grille n'apparaissent pas forcément, car certaines actions n'ont pas d'intérêt dans le cas d'application présent.

4.1.1 Modélisation du système

Nous allons proposer un ensemble de modèles par point de vue, cependant nous ne présenterons pas l'intégralité des modèles afin de ne pas occulter l'aspect essentiel qui est la démarche instrumentée d'analyse et d'action par points de vue et inter-points de vue.

4.1.1.1 Point de vue fonctionnel

Avant de modéliser fonctionnellement le laboratoire de contrôle qualité, nous allons d'abord nous intéresser à l'environnement auquel il appartient (usine de production).

La figure 4.1 montre les trois principales étapes de la production de médicament (hors fabrication du principe actif) : (1) la pesée des composants, (2) la fabrication proprement dite (passer de poudres/liquides/pâtes à des médicaments sous leur forme galénique (cf. tableau 1.1)) et (3) le conditionnement pour mettre la forme galénique au sein de ses conditionnements primaires, secondaires, tertiaires.

Le modèle fonctionnel présenté à la figure 4.1 montre également les flux logistiques d'un site de production avec le laboratoire de contrôle qualité. Ce dernier apparaît comme une succession de verrous du principal flux physique du site. De plus, il est clair que le laboratoire de contrôle qualité doit gérer quatre flux distincts (Matières Premières, Articles de Conditionnement, Semi-Finis et Produits Finis) simultanément.

Après avoir regardé les flux auxquels le laboratoire de contrôle qualité appartient, nous allons maintenant nous intéresser aux flux qui le composent avec les figures 4.2 et 4.3.

H. Grua et J.-M. Segonzac (1999) expliquent que « la logique de fonctionnement de certains ateliers peut rester opaque parce que les flux y sont trop compliqués, les machines trop diverses, les pièces trop variées, les gammes trop différentes. Vient un moment où la décomposition progressive du système global en éléments locaux s'arrête à un stade encore trop vaste. Le manque de performance de la *boîte noire* met en péril l'efficacité globale de l'usine, car la production qui en sort est trop entachée d'aléas. Il y a *boîte noire* lorsque toute tentative de représenter sur une page de format A4 les différents flux de produits par catégorie ou par client selon les cas aboutit à l'enchevêtrement le plus total. Il y a *boîte noire* lorsqu'on n'est pas capable de décrire de façon simple son fonctionnement interne : cycle de transformation, cheminement des pièces, réponse aux sollicitations externes (clients) ou interne

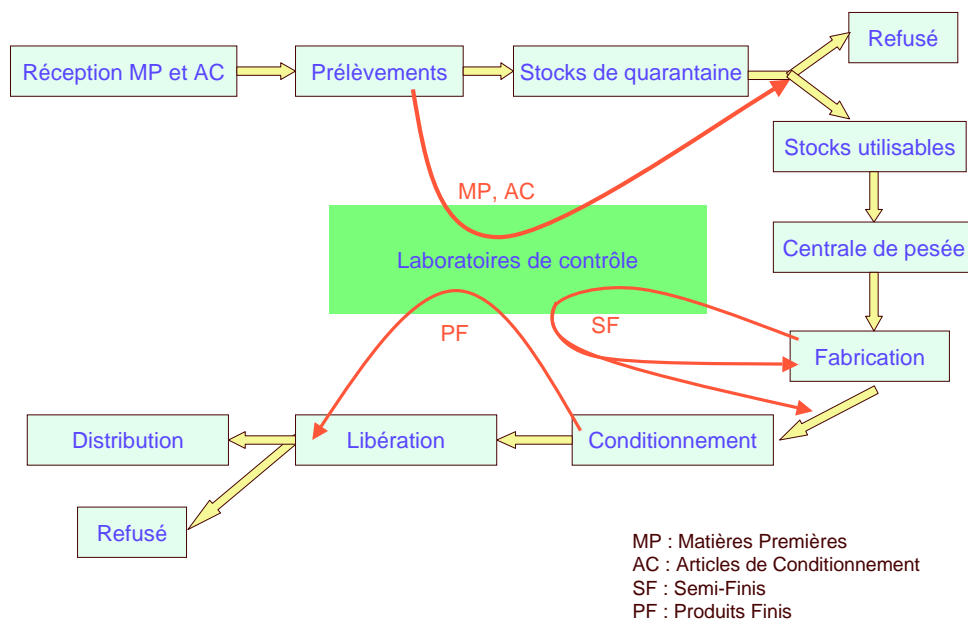


FIG. 4.1 – La place des laboratoires de contrôle qualité dans les flux logistiques d'un site de production de médicaments.

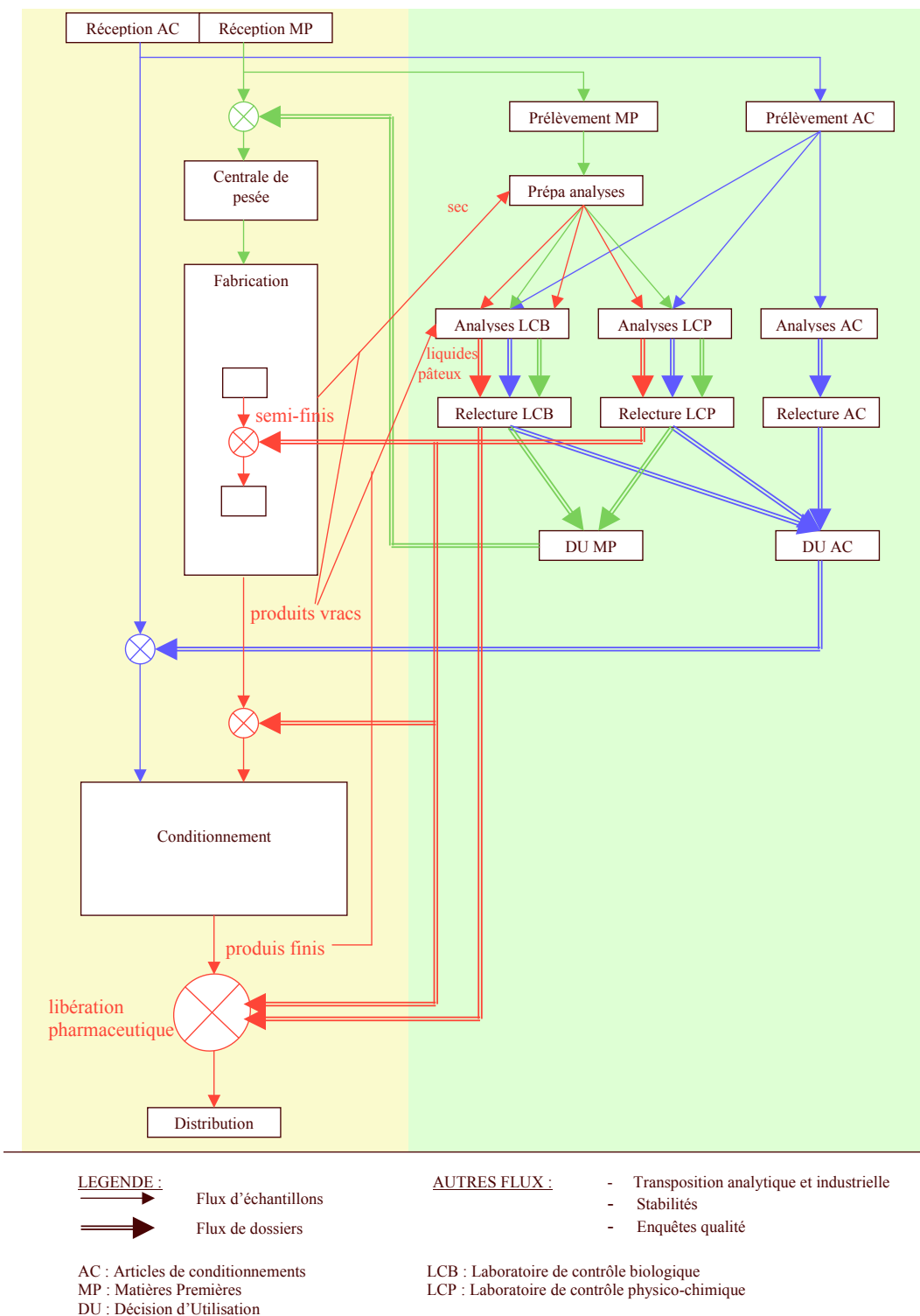


Fig. 4.2 – Modélisation macroscopique des flux des laboratoires de contrôle qualité.

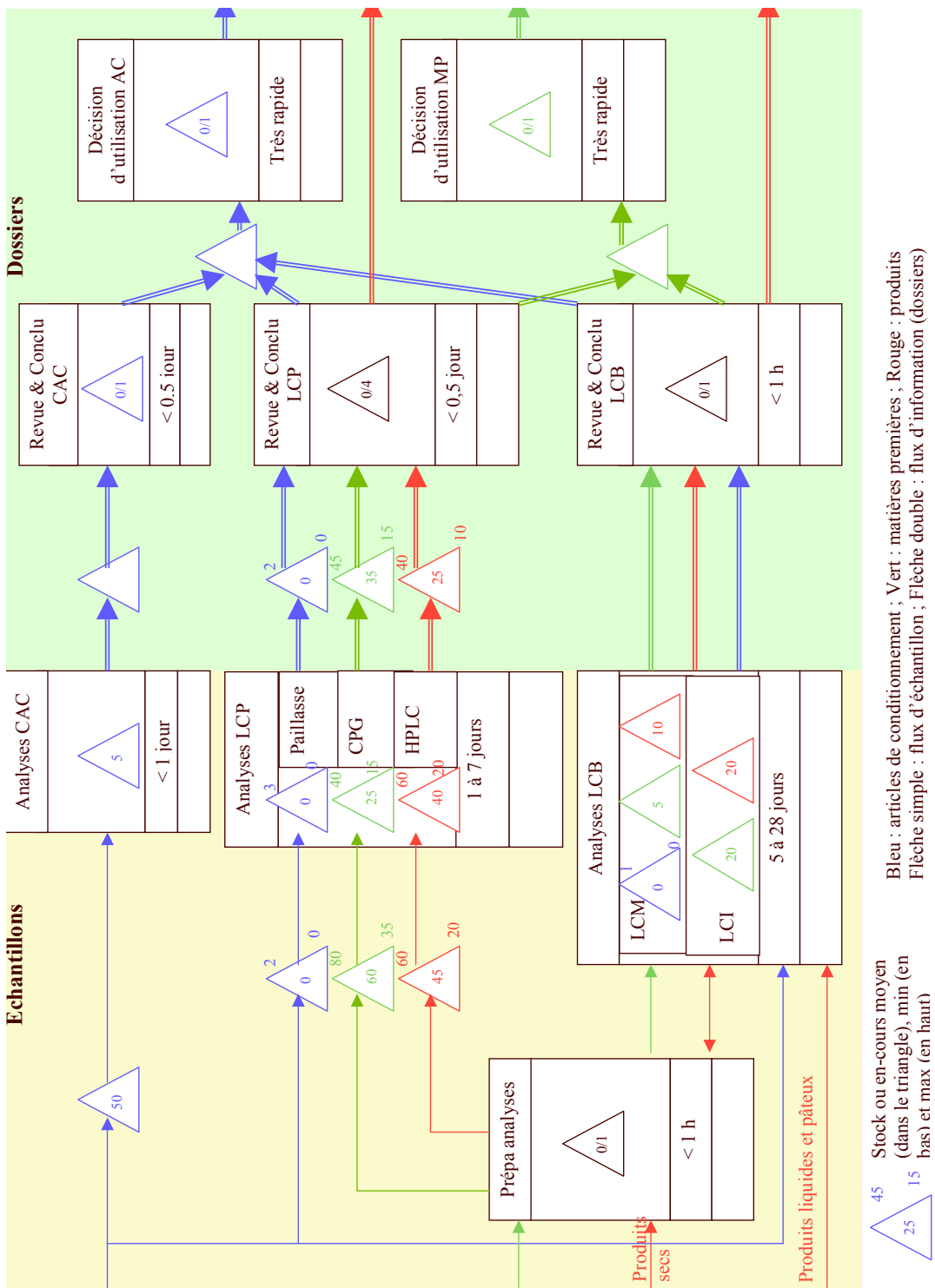


FIG. 4.3 – Modélisation détaillée et volumétrie des flux des laboratoires de contrôle qualité.

(entreprise). Il y a *boîte noire* lorsqu'on n'est pas capable d'anticiper la charge d'un atelier ou d'une ressource importante ».

Dans notre cas, les flux de la partie paillasse du laboratoire de physico-chimie sont complexes. Pour chacun des composés analysés (650), les gammes - déposées dans le dossier d'AMM - sont différentes, ce qui implique une diversité extrêmement importante. Une approche classique de type gestion de production avec une gestion fine (analyse charge/capacité) de toutes les ressources impliquerait une importante complexité dans les outils sans que l'intérêt en soit évident. Une sélection de ressources sera menée afin d'agrèger ce qui peut l'être. Nous nous arrêterons donc à ce stade de modélisation fonctionnelle.

4.1.1.2 Point de vue ressources

Sous la macro-ressource « laboratoire de contrôle qualité », on trouve en réalité cinq sous-ensembles différents :

- le service de prélèvement des matières premières ;
- le service de contrôle des articles de conditionnement ;
- le laboratoire de contrôle immunologique ;
- le laboratoire de contrôle micro-biologique ;
- le laboratoire de contrôle physico-chimique regroupant :
 - le laboratoire dit de « paillasse » ;
 - le laboratoire de chromatographie phase gazeuse (CPG) ;
 - le laboratoire de chromatographie phase liquide (HPLC).

Du point de vue des ressources techniques, le laboratoire de contrôle physico-chimique est constitué des familles de ressources présentées sur la figure 4.1.

Du point de vue des ressources humaines, cette activité mobilise 40 techniciens, 6 préleveurs, 6 agents de laboratoires, 6 contrôleurs d'articles de conditionnement, 7 agents de maîtrise, 1 animalière et 1 cadre.

4.1.1.3 Point de vue organisationnel

Le « laboratoire de contrôle qualité » est découpé en sept unités organisationnelles (nous indiquerons entre parenthèses les différents métiers présents dans ces unités organisationnelles) :

- le service d'ordonnancement du laboratoire (personnel administratif) ;
- le service de prélèvement (préleveurs) ;
- le laboratoire de contrôle des articles de conditionnement (contrôleurs articles de conditionnement) ;
- le laboratoire de contrôle immunologique (techniciens et agents de laboratoire) ;
- le laboratoire de contrôle micro-biologique (techniciens et agents de laboratoire) ;
- le laboratoire de contrôle physico-chimique (techniciens et agents de laboratoire) avec deux sous-sections :

TAB. 4.1 – Liste des familles de ressources techniques du laboratoire d'analyses physico-chimiques.

PHmètre
Mesure du point de fusion
Spectrophotomètre
Résistivimètre
Potentiomètre
Bain-marie
Chromatographie en phase liquide
Chromatographie en phase gazeuse
Réfractomètre
Densimètre
Distillateur
Texturomètre
Titrateur
Polarimètre
Balance
Conductivimètre
Viscosimètre
Turbidimètre
Thermomètre
Solutions colorées
Dessicateur
Débitmètre
Minéralisateur à micro-ondes
Creusets pour cendres sulfuriques et métaux lourds
Étuves
Centrifugeuses
Chromatographie sur couche mince
Spectroscopie d'absorption atomique à flamme
Dissolutest

-
- le laboratoire de chromatographie phase gazeuse (CPG) ;
 - le laboratoire de chromatographie phase liquide (HPLC).

Chacune de ces unités organisationnelles est encadrée par un ou plusieurs agents de maîtrise à l'exception du laboratoire de contrôle immunologique. Le responsable du laboratoire encadre ces différents agents de maîtrise selon le principe de l'organigramme en « râteau », les agents de maîtrise sont tous hiérarchiquement au même niveau.

4.1.1.4 Point de vue décisionnel

La modélisation GRAI permet de représenter la partie périodique du système de conduite et d'évaluer la pertinence ainsi que la cohérence par rapport à l'environnement. Dans la grille, nous représenterons en colonne les fonctions de l'entreprise qui sont étudiées, et en ligne, les périodes/horizons de décision. Chaque case est un centre de décision repéré en colonne par la fonction remplie et en ligne par la période et horizon de ses décisions.

Dans la modélisation, nous avons fait le choix de nous intéresser exclusivement aux deux entités que sont la production et le contrôle qualité, étant donné que nous nous intéressons principalement au temps de cycle des analyses de routine, donc la relation client/fournisseur entre la production, les approvisionnements et le contrôle. Nous nous sommes volontairement limités à la modélisation par la grille GRAI, car nous nous intéressons à la coordination des centres de décision de la production et du contrôle qualité.

4.1.1.5 Point de vue informationnel

Pour ce modèle, nous nous limiterons à une description des systèmes d'information utilisés par les laboratoires de contrôle qualité. Ainsi, nous ne détaillerons pas le fonctionnement de ces systèmes d'information.

Le système d'information des laboratoires de contrôle qualité au début du projet est un développement spécifique réalisé en interne, basé sur une architecture mainframe, appelé « VAX Application Contrôle ». Ce développement datait d'une dizaine d'années.

Dès le démarrage du projet concernant les laboratoires de contrôle qualité, nous savions que ce système d'information serait remplacé en novembre 2003 par le module QM (Quality Management) du progiciel de gestion intégré SAP R/3.

Les systèmes d'information dont nous parlons ici ne sont pas des LIMS (Laboratory Information Management System), destinés à gérer les aspects métiers du contrôle qualité, notamment la gestion des stabilités, la gestion des réactifs, l'interfaçage avec les appareils d'analyses pour la récupération automatique des résultats ou la gestion des comptes-rendus analytiques. En effet, le choix a été fait d'intégrer le plus possible la gestion du laboratoire de contrôle qualité au sein de l'ERP et de déployer des outils spécifiques pour des fonctionnalités très spécialisées qui ne pourrait pas être couvertes par l'ERP. Ainsi, le système d'information est une part de l'ERP, destiné à remplir les fonctionnalités principales d'un LIMS que sont la gestion des gammes de contrôle, la saisie des résultats et la décision d'utilisation. Ce choix a été fait suite à une analyse des fonctionnalités des LIMS qui a montré leur limite dans le pilotage du laboratoire de contrôle qualité.

	Infos internes	Gérer la production (fab + cond)				Gérer le contrôle				Infos externes
		Gérer les approvisionnements	Gérer la planif	Gérer ressources Tech Hum		Gérer les échantillons	Gérer la planif	Gérer ressources Tech Hum		
H = 1,5 an P = 1 an G = 3 mois				Invest et budget				Invest et budget		
H = 6 mois P = 3 mois G = 1 semaine	Infos maintenance		Plan maintenance							
H = 1 an P = 1 mois G = 1 mois	Prév France Données PIC		Valid prév Fr							Besoins export Cmdes ext.
H = 3 mois P = 1 mois G = 1 semaine	Plan de maintenance		Analyse charge/capa (réunions PDP)							Gestion RH labo
H = 3 mois P = 1 mois G = 1 jour			Faire 1° ordo dates+qtés							
H = 3 mois P = 1 semaine G = 1 jour	Données CBN	Cmdes long terme								
H = 1 mois P = 1 semaine G = 1 jour		Cmdes court terme								
H = 10 jours P = 1 semaine G = 1 jour					Gest RH atelier					
H = 1 mois P = 1 jour G = 1 jour		MàJ appro.	MàJ ordo dates						décider absences	
H = 1 jour P = 1 jour G = 1 jour	Données EDS Couv. stock		Lancer	Produire			Mise en main	Contrôler		
Temps réel	Besoins CdP + libé + prod	Pb appro		Pb capacité		Pb arrivée échant.			Pb capacité	

FIG. 4.4 – Grille GRAI de l'existant.

Le module QM de SAP R/3 reprend les fonctionnalités déjà présentes dans le « VAX Application Contrôle » avec une interface homme-machine très largement améliorée. Il permet également d'avoir un système d'information unique pour l'ensemble de la logistique de l'usine, participant de fait à l'intégration directe du laboratoire au cœur des processus de gestion du reste de l'usine. En outre, un tel système autorise des nouvelles fonctionnalités, telles que la dynamisation des contrôles (un contrôle peut avoir une périodicité au lieu d'être systématique), permettant d'envisager l'allègement des contrôles selon certaines règles.

4.1.2 Analyse des modèles

Nous utilisons la grille instrumentée présentée précédemment afin de conduire l'analyse de ces modèles, en considérant les indicateurs de performance présentés au début : d'une part le délai analytique (et plus finement le retard de l'analyse) et d'autre part, le coût de fonctionnement du système.

4.1.2.1 Fonctionnel

4.1.2.1.1 Analyse de la valeur ajoutée par étapes du contrôle qualité Nous pouvons décomposer (cf. figure 4.5) le cycle du contrôle qualité en quatre étapes majeures que sont (1) la file d'attente avant la réalisation de l'analyse, (2) l'analyse proprement dite, (3) la file d'attente avant l'étape de vérification du dossier et (4) la vérification du dossier et la conclusion (décision d'utilisation ou rejet du lot). En regardant les durées moyennes des différents sous-cycles (calculés par la division de l'encours moyen par le débit moyen), il apparaît assez rapidement que près de 75 % du cycle de contrôle qualité correspond à de l'attente. Cette proportion importante d'attente, bien que relativement classique en gestion industrielle, doit cependant être détaillée afin d'en comprendre les origines. L'ensemble des éléments d'analyse est présenté dans le tableau ci-après, ainsi que les pistes d'actions possibles, pour diminuer cette valeur et donc influencer sur le cycle global.

	attente mise en main	en cours d'analyse	attente, revue et conclusion
cycle moyen	5 jours	3,3 jours	3,7 jours
valeur ajoutée	* préparation des dossiers * gestion des priorités * gestion des regroupements (min charge) * lissage de la charge	* cœur de métier, analyse proprement dite	* relecture du dossier (vérification) * conclusion informatique
actions pour diminution	* meilleure gestion des regroupements * anticipation de l'arrivée d'analyses * gestion de la capacité à moyen terme	* allègements des contrôles * recentrage des techniciens sur l'analyse * optimisation des chromatographies	* mise en ligne de la relecture * comptes-rendus analytiques standardisés

FIG. 4.5 – Décomposition en étapes du cycle de contrôle qualité.

La première file d'attente pourra être améliorée du point de vue durée, mais aussi variabilité, en travaillant sur la planification moyen terme de la charge et la réponse capacitaire adaptée. À l'autre extrémité du cycle, le temps d'attente avant conclusion de l'analyse peut également être optimisé en travaillant sur la mise en ligne de la relecture après l'analyse. Cette démarche a cependant comme pré-requis la mise en œuvre de comptes-rendus analytiques standardisés. En outre, pour que la mise en ligne de la relecture puisse trouver son plein intérêt, nous devons avoir déjà travaillé sur la gestion des analyses en tenant compte des contraintes internes (comme la chromatographie), afin d'avoir une disponibilité de toutes les parties parallèles de l'analyse (microbiologie, immunologie, paillasse,

chromatographies) au moment du démarrage de la relecture. Ainsi, cette étape de mise en ligne de la revue de dossier trouvera son plein intérêt seulement une fois ces préalables atteints.

Un autre dysfonctionnement potentiel concernant le prélèvement de matières premières est découvert. Il apparaît que le prélèvement de matières premières est quasiment toujours suivi d'une détermination dite de diagnose, réalisée indépendamment du reste de l'analyse physico-chimique. La diagnose est une identification de la matière première pour vérifier que le nom indiqué sur l'étiquette correspond bien au contenu. Une intégration de cette activité peut être envisagée avec l'activité de prélèvement, permettant une économie de temps (gain d'un transfert d'échantillon et de la diagnose de l'échantillon) et de ressources. Cette analyse correspond à un remodelage de l'enchaînement des activités.

Nous nous apercevons également que les réactifs chimiques nécessaires à l'analyse sont préparés, au moment du besoin, par le technicien. Cela peut induire une préparation simultanée du même réactif, la non-utilisation d'un réactif par oubli de son existence, un temps de préparation long et l'augmentation du temps de cycle analytique. En outre, il faut noter que la liste complète des réactifs utilisés pour une analyse doit être écrite sur le compte-rendu d'analyse avec des détails comme la date de préparation ou celle de péremption. Cette longue liste (plusieurs dizaines de réactifs sur certaines analyses) prend un temps d'écriture au technicien. Une piste de solution serait de centraliser cette préparation de réactif, réalisée par une personne spécialisée dans la préparation de réactifs. Cette activité pourrait être équipée d'un système d'information permettant d'établir automatiquement la liste des réactifs utilisés pour une analyse, afin de la joindre au compte-rendu analytique. Il s'agit donc ici de paralléliser des activités qui sont assez indépendantes.

Une étape du contrôle qualité (une des déterminations réalisées au laboratoire d'analyses immunologiques) est très pénalisante de part sa durée, environ un mois. Une analyse de la justification de cette détermination a montré qu'elle n'était pas indispensable et que sa suppression pouvait être envisagée. Ce dysfonctionnement résultait d'une contrainte historique qui avait disparu, mais dont l'information n'avait pas été transmise au laboratoire de contrôle. L'élimination d'activités inutiles est un des moyens pour améliorer le point de vue fonctionnel.

4.1.2.1.2 Analyse de la valeur ajoutée par type de flux La segmentation des flux traversant le laboratoire de contrôle montre qu'ils évoluent chacun dans un environnement soumis à des contraintes différentes. Nous pouvons identifier quatre grands types de flux : les composants (matières premières et articles de conditionnement), les analyses in-process (entre étapes de fabrication), puis les produits finis secs (contrôlés avant le conditionnement sur le vrac) et enfin les produits finis liquides et pâteux, comme le montre la figure 4.3. Détaillons maintenant les contraintes de chacun de ces flux.

Pour les composants, la valeur du délai de contrôle a un impact direct sur le coût de stockage associé pour couvrir ce délai. La mise en place d'un allègement des contrôles (notamment avec la mise en place de la périodicité avec des gammes allégées ou encore les partenariats renforcés avec les fournisseurs pour ne pas refaire les analyses qu'ils ont eux-mêmes faites) permet d'envisager une réduction de ce coût de stockage.

Ensuite, si nous considérons les analyses en cours de fabrication, la contrainte provient de l'enchaînement au mieux des étapes de fabrication, que l'on pourrait traduire par une minimisation de l'encours de production. Pour les flux de produits finis, il nous faut différencier les formes sèches qui sont contrôlées sur le produit avant conditionnement (pas de problème qualité dans l'interaction contenu-contenant et contrôle au plus tôt) et les formes liquides et pâteuses qui doivent obligatoirement être

contrôlées après leur conditionnement pour tenir compte des interactions du point de vue qualité entre le contenu et le contenant. Ainsi, pour les contrôles de produits finis secs, le passage des échantillons au laboratoire d'analyse va se faire en même temps que le conditionnement du produit. Or, la fiabilisation du délai de contrôle et sa réduction ont permis d'avoir un délai de conditionnement qui est supérieur au délai de contrôle. Leurs délais de contrôle n'influent plus sur le temps de cycle industriel tant qu'ils sont en temps masqué par le conditionnement. En ce qui concerne les produits finis liquides et pâteux, le contrôle s'effectue après l'étape de conditionnement. Le contrôle qualité impacte directement le temps de cycle industriel. Ceci peut être traduit du point de vue des stocks en regardant le maillon « centre de distribution » de la chaîne logistique. Les stocks en centre de distribution sont définis par une couverture par rapport au marché, ainsi que par un stock couvrant le délai de contrôle et de libération des produits. Ces produits ont un statut inutilisable tant que la décision d'utilisation n'a pas été prise (contrôle qualité et libération pharmaceutique).

Maintenant que nous avons balayé l'ensemble des contraintes pour chacun des flux, nous pouvons essayer de voir globalement quelle stratégie utiliser pour répondre à cette contrainte de délai sur certaines analyses et l'absence sur d'autres.

Pour les contrôles in-process, certains sont dits bloquants : l'étape de production suivante ne peut être démarrée qu'après réception du résultat de l'analyse. Leur nombre important (une trentaine) et les contraintes qu'ils imposent au laboratoire (analyses souvent prioritaires) nous conduisent à vérifier qu'ils soient bien indispensables. Nous retrouvons donc ici une démarche d'élimination d'activités inutiles.

L'analyse de la valeur ajoutée par type de flux nous amène à prioriser les flux qui ont un impact fort sur le temps de cycle industriel et sur le niveau de stock. Ainsi, nous définissons comme prioritaire l'ensemble des analyses en cours de production (complété par la réduction de ces analyses bloquantes), les analyses liées à des composants avec une valeur de stock très élevée et enfin, les produits finis liquides et pâteux avec des flux importants générant un stock en centre de distribution élevé pour couvrir ce délai de contrôle qualité. La priorisation au sein du flux global des analyses est donc proposée.

4.1.2.2 Ressources

La seule analyse de fiabilité qui a été menée correspondait aux appareils chromatographiques en réseau (plusieurs machines pilotées par un même ordinateur). Ce système présentait un manque de fiabilité lié au manque de maîtrise d'un système nouveau.

4.1.2.3 Organisationnel

L'organisation du laboratoire de contrôle qualité présentait un seul dysfonctionnement, l'absence de responsable pour le laboratoire d'analyses immunologiques.

4.1.2.4 Décisionnel

La colonne « Gérer le contrôle » de la grille GRAI (cf. figure 4.4) est quasiment vide : le seul pilotage est un pilotage temps réel de la file d'attente de mise en main des analyses présentes au laboratoire.

La seule activité de planification est liée à la gestion des ressources humaines sans évaluation précise de la charge. Ainsi, notre premier constat est le manque de centres de décision au niveau du contrôle qualité afin de pouvoir piloter correctement le système. De ce fait, il semble pertinent de créer un centre de décision moyen terme, afin de gérer de façon prévisionnelle l'adéquation charge/capacité.

Ensuite, le deuxième constat est la présence d'un ré-ordonnancement quotidien de l'usine, du fait de la confrontation quotidienne des plannings de production avec les couvertures de stock liées aux ventes. Cette constatation met en évidence la nécessité d'une analyse de la flexibilité et de la réactivité des différentes ressources des laboratoires pour suivre les ré-ordonnements quotidiens de l'ensemble de la production.

Enfin, le troisième constat est le positionnement du centre de décision du contrôle qualité appelé « Mise en main ». Celui-ci opère sans vision prévisionnelle suffisante, étant donné que l'horizon est égal à la période ($H=P=1$ jour), mais aussi que l'horizon est inférieur au temps de cycle de l'opération qu'il gère ($H < d$, d est de 3 jours en moyenne). On se rend ainsi compte que ce centre de décision a un positionnement en temps réel par rapport au système opérant et qu'il est obligé de générer une longue file d'attente pour pouvoir gérer ses activités. Cependant, ce positionnement n'est pas incohérent, étant donné qu'il doit permettre de piloter finement l'activité : il faut donc chercher à augmenter son horizon. Cette constatation renforce les deux premières conclusions disant qu'il faut un centre de décision moyen terme pour le pilotage de l'équilibre charge/capacité de façon prévisionnelle, mais aussi mener une analyse complémentaire pour vérifier la flexibilité et la réactivité des différentes ressources.

4.1.2.5 Informationnel

L'analyse du point de vue informationnel montre principalement que certaines informations ne sont pas directement accessibles pour le laboratoire de contrôle qualité (par exemple : la date de besoin d'une analyse) et qu'inversement, le laboratoire n'offre pas de visibilité suffisante sur son activité (par exemple : quand une analyse sera terminée).

4.1.2.6 Fonctionnel-Ressources

En premier lieu, l'analyse des compétences et des aptitudes présentes pour les ressources et requises par les flux n'a pas mis en évidence de dysfonctionnement. En revanche, la partie concernant la dynamique de cette interaction fonctionnel-ressource a fait l'objet de plus d'investigations.

4.1.2.6.1 Flexibilité et réactivité des ressources des laboratoires Dans cette analyse (cf. figure 4.6), les ressources techniques des laboratoires de contrôle qualité autres que les chaînes de chromatographie ont été négligées, car elles sont largement sur-capacitaires, donc sans problème de disponibilité. Dans le cas où l'une d'elles deviendrait critique, son coût (faible en comparaison de celui d'une chaîne chromatographiques) permettrait de la rendre sur-capacitaire par un investissement modique.

Sur l'ensemble des laboratoires de contrôle hors des aspects chromatographiques, les ressources critiques sont des hommes, par nature flexibles et réactifs. Ainsi, les fréquentes remises à jour de la

programmation usine peuvent être suivies par ces personnes. De ce fait, l'adéquation charge/capacité suffit à vérifier l'acceptabilité opérationnelle de la charge. Dans ce cas, une augmentation de capacité serait quasi-exclusivement liée à une augmentation du nombre de techniciens (recrutement ou interim), mais en prenant en compte une période de formation nécessaire. Au bilan, ces ressources sont flexibles et réactives par rapport à l'évolution de charge, mais ne le sont pas pour l'évolution de leur capacité.

En ce qui concerne les laboratoires chromatographiques (HPLC et CPG), ils ne peuvent pas suivre les re-programmations de l'usine, étant donné leurs temps de reconfiguration conséquents. Deux approches doivent donc être menées : en premier lieu, il faut essayer de diminuer ces temps de reconfiguration de façon à rendre ces ressources réactives ; en cas d'impossibilité, travailler sur les méthodes de regroupements de séquence de travail nécessitant la même préparation. Enfin, pour les activités de chromatographie, l'augmentation de capacité passe essentiellement par l'investissement dans de nouvelles ressources techniques et la gestion fine de cette activité, étant donné la non-réactivité par rapport à l'évolution de la charge. Ces ressources sont flexibles par rapport à leur charge, sans être réactives.

	1/ Biologie (LCM+LCI)	2/ Paillasse et CAC	3/ Chromatographie	4/ Revue de dossier
CONSTAT	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de cycle incompressible ; • Maîtrise date de sortie ; • Faible coût de lancement ; • Lancement sans attente. <p>CYCLE MAITRISE</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de ressources techniques critiques ; • Cheminement libre; • Polyvalence des techniciens ; • Capacité liée au nombre de techniciens ; <p>FLEXIBLE & REACTIF</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ressources techniques critiques ; • Retests ; • Temps de setup très long ; • Maintenance. <p>FLEXIBLE mais PEU REACTIF et TRS FAIBLE</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de ressources techniques critiques ; • Capacité liée au nombre d'AM. <p>FLEXIBLE & REACTIF</p>
PROPOSITION	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune amélioration envisageable ; • La décision anticipée (risque économique) est le seul moyen de diminuer le cycle. 	<ul style="list-style-type: none"> • Séquencement de la liste de travail ; • Gestion RH à moyen terme via analyse charge capacité ; • Optimisation de la durée de formation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Etude de la réduction du temps de set-up ; • Ordo détaillé ; • Etude d'une nouvelle organisation ; • Structure de pilotage propre, séparée de la paillasse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ressources dédiées (relecture par tech tournant et revue par AM) • Accélérer revue de dossier.

CAC : Contrôles des Articles de Conditionnement
 AM : Agents de Maîtrise
 RH : Ressources Humaines

FIG. 4.6 – Tableau d'analyse des caractéristiques des principales ressources.

Pour mesurer l'impact de la faible réactivité des ressources chromatographiques, nous mesurons les délais en différenciant les analyses avec et sans chromatographie. La figure 4.7 montre que la chromatographie implique une augmentation du délai moyen d'analyse. Nous interprétons ces données comme la traduction en terme de délai de la difficulté de gestion des ressources chromatographiques. Par ailleurs, la mesure du TRS de ces ressources montre qu'il se situe aux alentours des 30 %, cor-

respondant à la mauvaise utilisation des nuits et des week-ends, du fait de la présence de temps de préparation importants. Le potentiel d'amélioration de l'utilisation de ces ressources est donc important.

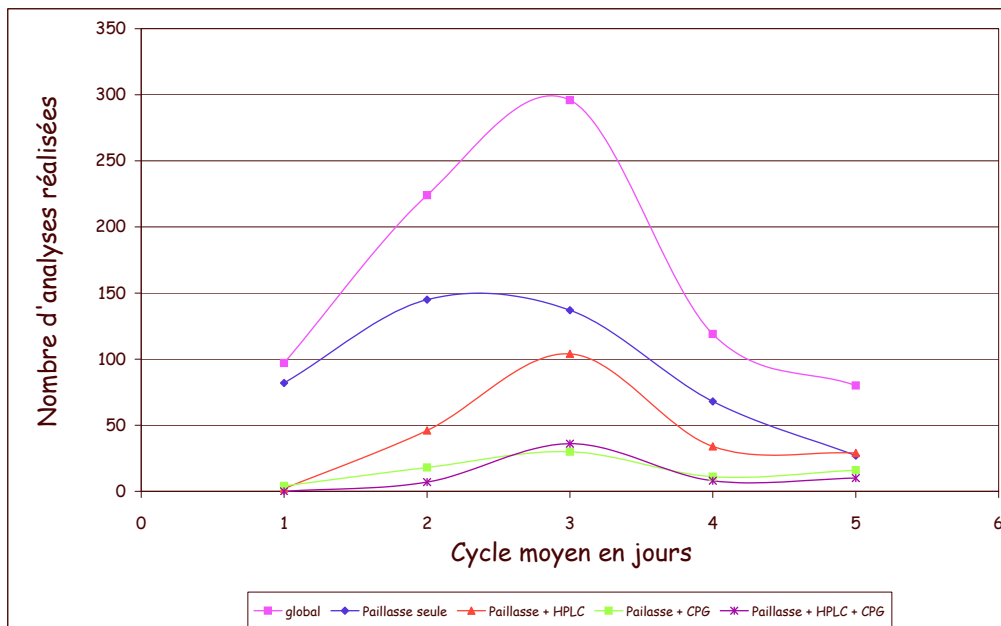


FIG. 4.7 – Répartition des analyses par temps de cycle selon leur macro-famille.

À partir de là, nous proposons de travailler la gestion de ces analyses chromatographiques afin d'obtenir une réduction du cycle analytique en synchronisant les parties paillasse et chromatographie. En outre, le taux d'occupation des chaînes chromatographiques étant faible, ce chantier visera aussi une amélioration notable de ce taux d'occupation, permettant une économie sur les investissements de l'activité de chromatographie nécessaires pour soutenir sa croissance. En effet, pour caractériser ces ressources, il faut aussi rappeler que leur taux d'occupation est relativement faible par rapport à ce qui est réalisable (TRS = 30 %), car aujourd'hui la grande majorité du travail est faite pendant les heures de présence des techniciens sans utiliser de façon optimale le potentiel d'automatisation donc de travail des chaînes en dehors des heures de présence des techniciens.

4.1.2.6.2 Un SMED impossible : le conditionnement des colonnes chromatographiques Une analyse chromatographique utilise comme ressource secondaire une colonne qui requiert un temps de préparation (appelé temps de conditionnement) relativement long (plusieurs heures). Nous reviendrons plus en détail sur cette problématique dans la partie suivante. Il est important de noter qu'en chromatographie, nous assimilons temps de changement de série et temps de conditionnement de la colonne, car la partie restante qui correspond au montage physique de la colonne sur la chaîne ainsi

que la mise en route de celle-ci ont des temps très courts. Cependant, nous devons remarquer que le changement physique de la colonne implique la présence du technicien, ce qui nous renvoie au fait que le lancement d'une analyse chromatographique ne peut être fait que pendant les périodes de présence de techniciens.

Pour augmenter la réactivité des laboratoires de chromatographie, la première piste de solution envisagée est de diminuer le temps de conditionnement de la colonne chromatographique. Pour cela, nous allons utiliser la méthode SMED (Single Minute Exchange of Die - Changement d'outil en moins de 10 minutes) mise au point par S. Shingo (1987). Selon cette méthodologie, il faut séparer les opérations de réglages en deux catégories : les réglages internes et les réglages externes. La première catégorie correspond aux opérations qui peuvent être faites uniquement lorsque la machine ne produit pas, alors que la seconde catégorie regroupe les opérations qui peuvent être faites quand la machine produit. L'esprit de la méthode SMED dit que les réglages externes ne sont pas pénalisants, car ils sont faits en temps masqué de la production. Ce ne sont donc pas des réglages mais des opérations externes, les seuls réglages étant internes. Tout le but de la démarche va donc être de transformer des réglages internes en opérations externes afin de minimiser le temps de réglage. Pour y arriver, sept étapes devront successivement être franchies :

Stade 1 Séparation des réglages internes et externes

- (1) utilisation d'une check-list des pièces et des phases nécessaires pour un changement d'outil
- (2) essai des fonctions (vérifier que les pièces utilisées sont correctes)
- (3) amélioration du transport des outillages et autres pièces

Stade 2 Conversion des réglages internes et externes

- (4) préparation d'avance des conditions de l'opération
- (5) standardisation des fonctions (pièces et outils)

Stade 3 Rationalisation de tous les aspects des opérations de réglages

- (6) améliorations radicales des opérations externes
- (7) améliorations radicales des réglages internes

Dans le cadre de notre problématique, le temps des opérations nécessitant une intervention humaine (amener la nouvelle colonne, arrêter la chaîne, programmer la chaîne, changer l'alimentation de la phase mobile, démarrer la chaîne) est faible en comparaison du temps total de changement d'outil. Nous voyons donc que la majeure partie de ce temps est un temps machine, donc qui ne peut être fait que lorsque la chaîne fonctionne. Ceci est dû à la nature de l'opération et son fondement technique (nettoyage et mise en équilibre des différentes phases). Nous arrivons donc à la conclusion qu'il n'est pas possible d'externaliser ce temps (le positionner lorsque la machine produit), car il faut que la machine soit en marche. Une hypothèse de travail aurait pu être de travailler sur des chaînes chromatographiques avec deux colonnes, une qui produit et une qui se conditionne, mais cela nécessiterait que les deux colonnes soient balayées avec la même phase mobile et dans les mêmes conditions de températures, deux paramètres qui sont très dépendants de l'analyse. Une autre piste pouvait être de doubler le circuit de phase mobile pour ne plus garder que la contrainte de la température, mais elle serait encore trop contraignante et le coût d'un double système d'injection serait très élevé. Enfin, la dernière approche envisagée était l'invention d'un appareil appelé « conditionneur », actuellement

inexistant sur le marché, et permettant d'effectuer cette préparation. Cependant, le prix d'un tel appareil, s'il existait (quasi-équivalent à celui d'une chaîne complète) et le problème du découpage en deux étapes dissociées d'une activité mono-étape auparavant (on peut enchaîner l'analyse après le conditionnement de façon automatique), ne rendent pas concluantes ces investigations. Enfin, il apparaît clairement que les chaînes chromatographiques sont davantage conçues et utilisées dans l'optique de réaliser toujours la même analyse (utilisation principale dans le domaine de la chimie à procédé continu ou dans des domaines à procédé batch, mais avec les chaînes dédiées à des analyses, vu les volumes de produits réalisés). Ceci explique que l'utilisation décrite ici, avec de fréquents conditionnements, soit problématique, car complètement inadaptée aux contraintes technologiques. On ne peut donc faire ni l'étape 4, ni l'étape 6, ni l'étape 7 du SMED. La standardisation (5) demanderait une standardisation soit des protocoles de test, soit des colonnes, ce qui est impossible d'un point de vue pratique.

4.1.2.6.3 Organisation des flux sur les ressources Tout d'abord, une réflexion a été menée sur l'opportunité de créer des îlots de contrôle pour certaines analyses générant des contraintes industrielles particulièrement importantes (stocks, délais). L'analyse a montré le manque de pertinence de cette approche par îlots, étant donné les volumétries insuffisantes des analyses ciblées pour spécialiser des ressources qui n'auraient pas été chargées correctement. Cette spécialisation aurait réduit la capacité globale du laboratoire en privant les autres analyses d'équipements n'étant pas totalement occupés. Dans le cas d'une modification du mix-produit et notamment l'arrivée d'un produit liquide ou pâteux à très forte volumétrie sur une même analyse, il serait opportun de réétudier cette piste de solution.

Ensuite, une autre réflexion s'est amorcée sur l'organisation du travail. En première approche, nous pouvons dire que les techniciens réalisent l'ensemble des déterminations des analyses qui leur sont confiées. Cependant, d'autres organisations sont envisageables, telles que la spécialisation des techniciens sur des postes de travail regroupant une ou plusieurs déterminations. Cette alternative présente qualitativement des impacts assez facilement quantifiables sur l'intérêt du travail pour les techniciens, sur l'harmonie de l'analyse ou encore la plus ou moins grande facilité de gestion (gérer les déterminations séparément générerait une difficulté importante dans la coordination de l'ensemble pour obtenir l'analyse entière). En revanche, l'impact quantitatif sur l'occupation des ressources et les délais d'analyse est difficilement mesurable par des analyses simples, et nécessite donc une analyse par un outil de simulation de flux.

4.1.2.7 Ressources-Organisationnel

Deux dysfonctionnements sont identifiés sur ce point. D'une part, le laboratoire d'immunologie, qui n'a pas de responsable, a un métier assez proche du laboratoire de microbiologie, puisque les deux concernent des analyses biologiques. D'autre part, la charge de gestion de l'ensemble du laboratoire de contrôle qualité est trop importante pour un seul responsable et le recrutement d'un responsable-adjoint est nécessaire.

4.1.2.8 Fonctionnel-Décisionnel

Le grand nombre de dysfonctionnements mis en lumière sur les points de vues fonctionnels et décisionnels séparément nous conduisent à des changements importants. La reconception du système avec ces modifications est faite de façon à ne pas créer de dysfonctionnement sur l'inter-points de vue.

4.1.2.9 Ressources-Décisionnel

Les déterminations par chromatographie ont un impact important sur la performance du système en termes de délai, ce qui nécessite un pilotage particulier de ce type de ressource avec un système de décision adapté (aide à la décision nécessaire étant donné la complexité du problème), ainsi qu'une coordination avec le pilotage des autres ressources du laboratoire de contrôle qualité. Un centre de décision spécifique d'un type de ressources est donc nécessaire. Nous reviendrons sur cette problématique dans la deuxième partie de la thèse.

4.1.2.10 Informationnel avec les autres points de vue : les informations requises

La vision exacte et permanente de l'état de la file d'attente, de l'encours d'analyse et la file d'attente de la revue de dossier, n'existent pas. En plus de ne pas permettre au laboratoire de connaître son état à tout instant, ces informations ne peuvent être suivies pour se comparer à un historique. En outre, nous remarquons qu'une grande partie de la gestion du système, comme les gammes de contrôles, est sous format papier. Le système d'information du laboratoire de contrôle qualité est donc un frein au développement du système de pilotage. Une évolution doit donc être menée en plusieurs étapes. Tout d'abord, une vision des différents encours du laboratoire et un suivi par tableau de bord doivent être mis en place. Ensuite, de nouveaux centres de décisions - supportés par un système d'information adapté - doivent être créés. Ce système d'information sera au départ avec des informations simples, puis devra intégrer les aspects transactionnels avant d'intégrer une aide à la décision pour le pilotage des sous-systèmes les plus complexes.

4.2 Traitement du système

Nous présenterons ci-dessous uniquement les points de vue et inter-points de vue ayant fait l'objet d'actions d'amélioration.

4.2.1 Fonctionnel

4.2.1.1 Recentrage des techniciens sur leur valeur ajoutée

Une des premières étapes pour rationaliser l'activité est de libérer le technicien des tâches annexes à l'analyse proprement dite, pour le concentrer sur ce qui est sa réelle valeur ajoutée. Ainsi, dégager le technicien de la préparation des réactifs nécessaires à ses analyses, de la rédaction des rapports de traçabilité de ces mêmes réactifs (5 à 50 réactifs par analyse) et d'une partie des rapports d'analyse, sont des pistes pertinentes pour réduire le temps de cycle analytique et le coût de fonctionnement.

4.2.1.2 Suppression des analyses superflues

Les analyses de toxicité anormale, qui continuaient à être faites alors qu'elles n'étaient plus nécessaires, ont été supprimées permettant de fortement diminuer les contraintes logistiques sur certains produits (les temps de cycle les plus longs étaient générés précisément par ces tests). En outre, lors de résultats non conformes avec les spécifications, l'analyse était le plus souvent refaite, sans être sûr de l'intérêt de cette manœuvre. Ceci générait une activité auto-induite qui pouvait être fortement réduite. Pour ce faire, une procédure et un logigramme de traitements des non-conformités ont été mis en place afin de gérer ce cas de figure et donc ne pas amputer inutilement la capacité des laboratoires.

4.2.1.3 Diminution des contrôles bloquants

Entre certaines étapes de fabrication ou entre la fabrication et le conditionnement, un contrôle - dit bloquant - était présent. En fait, l'étape antérieure envoyait au laboratoire un échantillon à analyser, et l'étape ultérieure ne pouvait être démarrée que lorsque le résultat était donné par le laboratoire de contrôle qualité. Cependant, après analyse, il est apparu que dans une majorité des cas, le caractère bloquant de ces contrôles n'avaient pas de raison d'être, l'étape suivante pouvait être réalisée sans attendre les résultats de l'analyse. Cela a permis de supprimer des freins à la production de certains produits, mais le niveau d'activité du laboratoire n'a pas diminué étant donné que les analyses doivent quand même être faites. Cependant, la contrainte d'enchaînement supprimée, le laboratoire dispose de plus de liberté dans l'organisation de son travail, la nouvelle contrainte étant la date de fin d'analyse du produit fini. En plus, dans certains cas, les produits intermédiaires et finis étant proches, des couplages peuvent être faits permettant un effet d'échelle. Celui-ci peut également être obtenu en regroupant plusieurs analyses identiques, lors de campagne par exemple. Ceci était impossible lorsque les contrôles bloquants existaient.

4.2.1.4 Rationalisation du flux : prélèvement et identification couplés

L'étape d'identification faite sur tous les contenants de matières entrant sur le site était séparée de l'étape de prélèvement. L'idée de mettre l'étape d'identification dans le box de prélèvement et de faire réaliser par le préleveur lui-même permet de dégager un technicien pour d'autres analyses et simplifier grandement le flux. La solution retenue, compromis avec les coûts engendrés, permet de déplacer la cellule d'identification dans un local connexe au box de prélèvement, la manipulation de prélèvement étant toujours nécessaire mais l'analyse étant faite dans la foulée.

4.2.1.5 Les fournisseurs de composants

Au vu du produit et du contexte réglementaire du secteur pharmaceutique, une diminution de l'activité de contrôle qualité ne signifie aucunement une diminution du contrôle qualité, mais un changement des moyens mis en œuvre pour y parvenir. Nous allons voir plusieurs actions à engager pour diminuer l'activité de contrôle qualité sans impacter la qualité du produit, ni enfreindre les textes réglementaires.

4.2.1.5.1 Suivi du nombre de lots fournisseurs par réception de commande Le contrôle qualité des composants entrant dans la fabrication des médicaments s'effectuant par lot de production du fournisseur, plus le nombre de lots est faible pour une même commande et plus la charge du laboratoire de contrôle qualité diminue. À l'opposé, si un fournisseur livre une même commande avec plusieurs de ses lots alors qu'il avait la possibilité de le faire en un seul, la charge de contrôle se trouve nettement augmentée. Cette affirmation doit cependant être nuancée par le fait que deux analyses identiques groupées représentent moins de deux fois la charge de travail unitaire. En résumé, même si la diminution n'est pas flagrante, le suivi d'une dérive éventuelle des fournisseurs permet d'éviter une génération d'activité inutile, étant donné que pour les fournisseurs ce peut être une façon d'écouler des fins de lots.

4.2.1.5.2 Analyses multiples d'un même lot fournisseur Un autre point est la ré-analyse d'un lot d'un fournisseur que l'on a déjà réceptionné. Ce cas de figure se retrouve surtout lorsque la matière est produite avec une taille de lot très grande au regard de nos besoins. Pour les paramètres n'étant pas susceptibles d'évoluer dans le temps, un recontrôle pourrait être évité. Une action en ce sens a été mise en œuvre de façon à éviter ce recontrôle via une procédure adaptée.

4.2.1.5.3 Établir des relations de coopération avec les fournisseurs de composants Pour un composant donné, il est tout à fait envisageable que les deux partenaires de la relation client-fournisseur effectuent un contrôle qualité : d'une part, le fournisseur, afin de s'assurer qu'il va livrer un produit correct, d'autre part, le client avant de le mettre en œuvre. Si les paramètres contrôlés sont identiques et si une confiance peut s'instaurer entre les deux protagonistes, alors une démarche de coopération peut se mettre en œuvre afin de limiter l'activité de contrôle de l'usine pharmaceutique qui réceptionne. De plus, l'existence d'une telle démarche permet une optimisation du point de vue logistique, puisqu'elle permet une mise en œuvre des composants dès leur réception, soit un approvisionnement au plus près du besoin, un stockage de très courte durée, etc. Une série d'actions a été menée en ce sens avec les services qualité, achats et logistiques de l'entreprise pour définir un plan d'audit permettant la mise en œuvre de telles améliorations.

4.2.2 Organisationnel

Une unité organisationnelle (laboratoire d'analyses biologiques) a été créée en regroupant sous le même responsable les deux unités organisationnelles d'immunologie et de biologie.

4.2.3 Décisionnel

4.2.3.1 Visibilité des flux logistiques du contrôle qualité

La première action entreprise a été d'obtenir une amélioration de la visibilité des flux de contrôle qualité. Pour ce faire, un tableau mural a été installé dans lequel des fiches en T viennent représenter l'activité et l'étape à laquelle en est l'analyse dans le processus. Cet outil permet à la fois une visibilité aisée sur l'activité des laboratoires de contrôle, un partage de l'information avec les clients internes et une source d'information permettant de dresser hebdomadairement des tableaux de bord d'activité.

4.2.3.2 Visibilité court et très court termes

Concernant le très court terme, les laboratoires ont besoin de savoir quelles sont les analyses pour lesquelles le résultat est attendu : une expression des besoins clients à court terme. Cependant, ces informations ne sont pas suffisantes pour être en mesure d'effectuer un lancement des analyses étant donné que l'horizon de visibilité est trop réduit. Pour le domaine du court terme et notamment de l'aide au lancement des analyses (dans le vocabulaire métier, l'aide à la mise en main), les laboratoires ont besoin d'éléments indicatifs pouvant être obtenus par une information du type : (date de besoin)-(durée du cycle). Cette opération, compte-tenu des imprécisions, ne fournit pas de date de lancement impérative et absolument fiable, mais au moins l'ordre de lancement des analyses. Pour réaliser ces deux grands types d'états d'informations, c'est l'outil des « queries » (requêtes) de SAP R/3 qui a été retenu de façon à générer des informations simples et exploitables.

Une évolution de ces outils simples a été menée en les intégrant à une transaction de gestion de la mise en main. L'agent de maîtrise chargé de l'affectation des analyses aux techniciens aura ainsi une information sur les compétences des techniciens, mais aussi sur la charge de travail induite pour le technicien par l'analyse affectée. En outre, le tri de la liste de travail, selon les mêmes règles que pour les sorties papier des « queries », viendra lui apporter une aide à la décision sur l'analyse à lancer en priorité.

4.2.3.3 Visibilité moyen terme : analyse prévisionnelle charge / capacité

La durée de formation d'un technicien durant généralement de un à trois mois, le démarrage d'un technicien recruté est nécessaire avant la période de charge à laquelle il doit être opérationnel. Ainsi, une démarche d'analyse du taux de charge des différentes ressources doit être mise en œuvre. Pour engager cette démarche, il faut définir les ressources sur lesquelles focaliser l'analyse. Il apparaît nécessaire de commencer par l'aspect des ressources humaines des laboratoires, car une action à court terme en cas de taux de charge anormal peut être engagée.

En ce qui concerne le centre de décision sur la gestion des ressources chromatographiques, se pose maintenant le problème de la mise en œuvre organisationnelle d'une telle solution. Après réflexion, nous pouvons dégager une organisation cible réaliste avec une gestion du changement dans le laboratoire. La proposition revient à définir la préparation des échantillons pour l'analyse chromatographique comme la première opération à effectuer dans une analyse, et au fait que la cellule d'ordonnement du laboratoire (qui fonctionne déjà) indique au technicien une information supplémentaire par rapport au fonctionnement actuel : la chaîne chromatographique à utiliser et le créneau de passage. Ces deux modifications dans l'organisation du laboratoire sont identifiées comme mineures et avec une gestion du changement accessible, car la structure globale et le fonctionnement du laboratoire ne sont nullement bouleversés.

Le chantier concernant la gestion des laboratoires d'analyses chromatographiques est lancé sous le nom de projet AMMAC : Aide à la Mise en Main des Analyses Chromatographiques. Cependant, les outils nécessaires à la réalisation de cette programmation des analyses chromatographiques n'existent pas. Son étude fera l'objet de la seconde partie de la thèse.

Nous pouvons voir sur la figure 4.8 ces deux nouveaux centres de décisions et leur interfaçage dans l'environnement existant. L'adéquation mensuelle charge/capacité du laboratoire est assez bien précisée par rapport au centre de décision budgétaire et à son homologue pour la gestion de la production.

Enfin, sur la grille apparaît un centre de décision lié à l'ordonnancement de la chromatographie dont les contours sont encore flous puisque des études complémentaires sont nécessaires pour pouvoir préciser plus finement son rôle. Ces deux nouveaux centres de décision vont être la clef de voûte du projet sur le point de vue décisionnel.

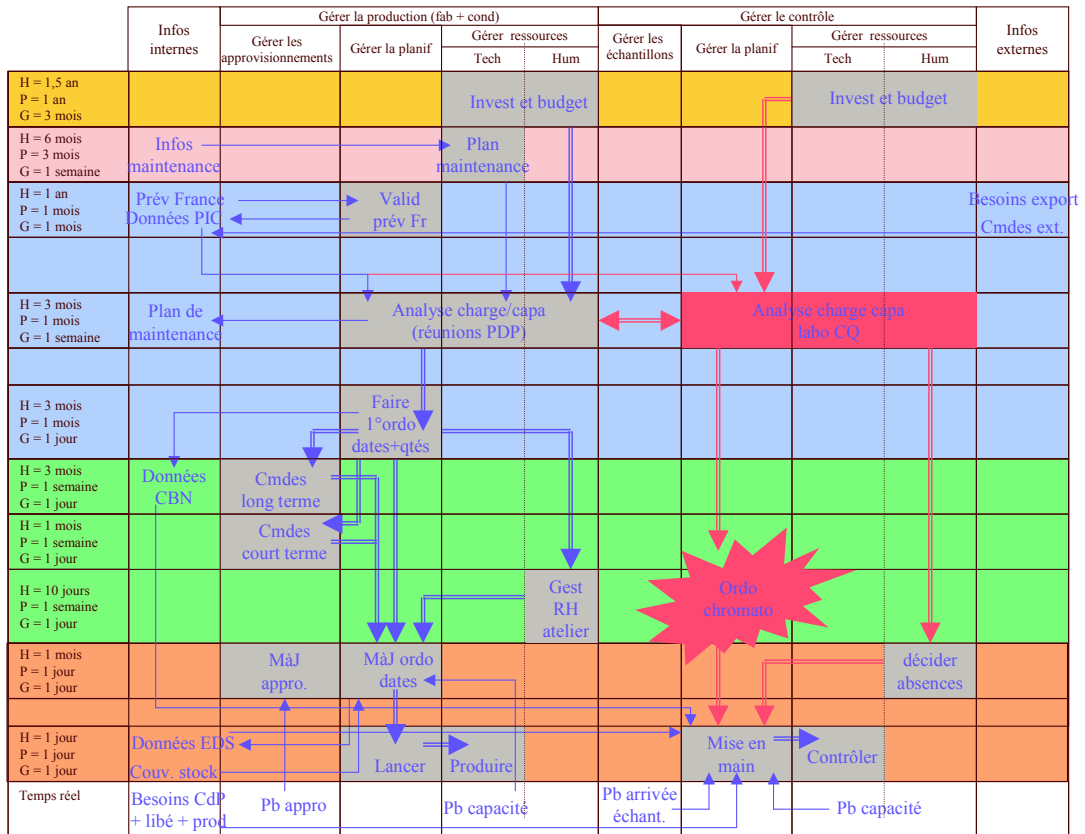


FIG. 4.8 – Grille GRAI des solutions organisationnelles envisagées.

4.2.4 Informationnel

La mise en place des plannings muraux a permis une amélioration de la diffusion et de la réception d'informations. Le déploiement de l'ERP SAP R/3 au laboratoire de contrôle qualité permet une informatisation de la gestion des données (gammes de contrôles notamment), ainsi qu'une intégration d'informations permettant la constitution d'outils support au pilotage court et moyen termes du laboratoire. L'unicité et la disponibilité de l'information, ainsi que la surveillance de sa fiabilité, qui sont nécessaires pour le fonctionnement de l'ERP, vont être bénéfiques pour le fonctionnement du laboratoire de contrôle qualité.

4.2.5 Ressources-Organisationnel

Un pont de compétence a été créé entre les deux entités (laboratoire de microbiologie et d'immunologie) par la formation de techniciens polyvalents sur les deux métiers et pouvant être affectés à l'un ou l'autre des laboratoires suivant le besoin. En ce qui concerne la gestion de l'ensemble du laboratoire, le recrutement du responsable-adjoint a été réalisé.

4.2.6 Informationnel avec les autres points de vue : les informations requises

Pour le besoin de suivi des encours du laboratoire, un planning mural avec fiches en T a été mis en place. Il permet de suivre le cheminement d'une analyse, depuis sa réception jusqu'à sa conclusion. Cette action a été menée en dehors des systèmes d'information pour une trois raisons : (1) la rapidité de la mise en œuvre industrielle, (2) la gestion du changement du fait de la simplicité de prise en main des outils proposés et (3) du fait du projet de changement de système d'information des laboratoires de contrôle qualité. Cette action a été complétée par le déploiement de requêtes SAP pour initier une aide à la décision sur le pilotage court terme des flux d'analyses. Par la suite, une évolution de ces outils de gestion court terme est réalisée via l'intégration à l'ERP d'une transaction de gestion de la mise en main. L'aspect du pilotage à moyen terme est en cours de conception technique.

4.3 Conclusion sur le contrôle qualité : une activité de service qui doit rester autonome

Le laboratoire de contrôle qualité d'une usine de production pharmaceutique peut être vu comme une activité de service au sein de cette usine. D'une part, il est un maillon récurrent de la chaîne logistique interne, donc il gère de multiples flux parallèles. D'autre part, la valeur ajoutée d'un laboratoire de contrôle (i.e. les analyses, les résultats) n'est pas un bien matériel mais une information (analyse conforme : oui/non) succédant à une entité physique (l'échantillon). Pour cela, le laboratoire s'engage sur un délai dans lequel il doit donner cette information. Le fait que le laboratoire soit une activité de service découle donc du fait qu'une multitude de clients va lui demander de façon plus ou moins prévue un flux d'information résultant d'un flux physique avec des contraintes de délai plus ou moins marquées suivant le type d'analyse.

Il apparaît clairement que si l'on souhaite anticiper une analyse prévisible pour le laboratoire de contrôle, il faut modifier l'ensemble de la planification du reste des ateliers de l'usine. Pourquoi ? Le laboratoire de contrôle n'est pas planifié comme un atelier classique de l'usine, puisque certains de ses flux ne sont pas prévisibles (par exemple les analyses complémentaires pour une production partiellement défectueuse). De plus la complexité des flux et de sa gestion pénalisent la solution qui viserait à intégrer le pilotage du laboratoire avec celui des autres ateliers de l'usine, autorisant alors les décalages de production pour des problématiques de contrôle. Les choix industriels sont clairs, il n'est pas question de s'autoriser à décaler la charge de l'ensemble de l'usine pour une problématique de contrôle, alors que le contrôle possède, de par sa structure et son métier, une souplesse de gestion qui n'existe pas pour des ateliers de production classique. De ce fait, le pilotage du laboratoire de contrôle doit rester interne au laboratoire et le reste de l'usine doit le considérer comme un délai avec une variabilité, aussi réduite que possible bien entendu. L'autre impact de ce choix industriel majeur

est de tolérer l'existence et une variabilité de la file d'attente avant mise en main. Ainsi, le principe général de pilotage du laboratoire va rester le même que ce qu'il est aujourd'hui : un pilotage par rapport à la file d'attente, en autorisant les produits à se doubler, afin de répondre aux contraintes réelles du système. Au bilan, l'ensemble de ce fonctionnement va induire un ordonnancement du laboratoire qui réponde à l'ensemble des contraintes externes au laboratoire, étant supposé qu'il n'y a pas de contrainte interne. Or, nous savons depuis l'analyse de la réactivité des différentes ressources du laboratoire que les deux laboratoires de chromatographies vont poser des problèmes de gestion interne. De ce fait, la cible du pilotage du laboratoire devra également tenir compte de la gestion des analyses chromatographiques qu'il nous reste à étudier.

Au bilan du projet, le temps de cycle lié au laboratoire de contrôle qualité a été ramené de 16 jours à 11 jours, soit une diminution de l'ordre d'un tiers. En outre, le coût de fonctionnement du système a été diminué de l'ordre de 200 000 euro par an, ce qui représente un peu moins de 10 % du total. Enfin, la réduction des stocks qui a également été réalisée représente une diminution de quelques centaines de milliers d'euro de l'immobilisation.

4.4 Conclusion sur la démarche : les instruments de l'action

L'ensemble des actions présentées ont été menées en utilisant une partie des instruments d'action proposés dans la grille de la figure 3.3. Ainsi, les principes du BPR ont été appliqués pour les actions sur le point de vue fonctionnel (suppression d'activités inutiles, modification des processus, parallélisation d'activités...). Pour le point de vue décisionnel, c'est la reconception partielle de la grille GRAI qui a été réalisée. Sur des chantiers précis, comme la gestion centralisée des réactifs du laboratoire, l'action s'inspire d'une approche de type Kaizen avec un management proche du Hoshin Kanri (concentration sur des objectifs en nombre limité) qui a permis un temps de réalisation très court (inférieur à six mois) grâce à la mobilisation de tous. Le chantier concernant l'allègement du contrôle des composants est très proche d'une approche de type Production au Plus Juste. La communication visuelle a été mise en œuvre avec les tableaux muraux, de nombreux instruments de base ont également été utilisés pour mener à bien ces actions, on peut par exemple citer le diagramme de Paréto, le brainstorming, les logigrammes, etc.

Synthèse de la partie

Dans cette partie, une méthode a été proposée pour aider à l'amélioration d'un système industriel socio-technique où le niveau indiqué par les indicateurs de performance est qualifié de mauvais. Nous avons d'abord identifié deux courants scientifiques, un s'intéressant à l'amélioration des systèmes industriels et l'autre se focalisant sur la modélisation de ces systèmes. Nous avons proposé une méthode qui utilise la modélisation dans la phase de diagnostic des dysfonctionnements du système industriel considéré. Ensuite, une phase d'analyse du modèle obtenu est réalisée. Enfin, une fois les actions prioritaires, elles sont pilotées pour leur réalisation. Nous avons proposé en outre une instrumentation des différentes étapes de cette méthode. Nous avons terminé cette partie en appliquant cette méthode à un laboratoire de contrôle qualité au sein d'une usine pharmaceutique du groupe Pierre Fabre, afin de déterminer le plan d'actions pour améliorer ce système.

Cette méthode, développée et appliquée pour les systèmes industriels, nous paraît pouvoir être appliquée à l'ensemble des systèmes socio-techniques, tels qu'ils sont définis au début de cette partie.

Deuxième partie

Problème d'ordonnancement à machines parallèles flexibles

Introduction de la partie

Au chapitre 4, l'application de la méthode d'analyse proposée a fait apparaître l'absence d'un centre de décision pour piloter le laboratoire de contrôle qualité à court terme. Ce centre décision, appelé Ordonnancement chromatographique, a été modélisé dans la grille GRAI de la figure 4.8 comme appartenant à la fonction Gérer la planification du contrôle qualité, avec un horizon de 10 jours et une période hebdomadaire. En outre, l'analyse de la flexibilité et de la réactivité des ressources (cf. 4.1.2.6.1) a permis d'identifier que les laboratoires de chromatographie ont des ressources techniques qui sont très flexibles, mais très peu réactives. Ce manque de réactivité est lié à la présence d'un temps de préparation très important en regard du temps opératoire. Un SMED a été essayé, mais il s'est révélé impossible d'externaliser ne fût qu'une opération interne (cf. 4.1.2.6.2). L'étude des temps de cycle par macro-ressources (cf. 4.7) a montré que les analyses nécessitant l'utilisation des ressources chromatographiques avaient un temps de cycle plus important que celles qui n'y font pas appel. Enfin, le TRS des chaînes chromatographiques a été mesuré aux alentours de 30 % (cf. 4.1.2.6.1). Ceci signifie que pour réaliser le même travail, une immobilisation de matériel trois fois plus faible serait suffisante, si le TRS approchait les 100 %. Ceci représenterait une réduction des immobilisations de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'euro dans notre cas d'application industriel. Au final, l'ensemble de ces paramètres justifie l'étude d'un problème d'ordonnancement concernant les laboratoires d'analyses chromatographiques.

Dans cette partie, nous allons formaliser et étudier ce problème d'ordonnancement. Tout d'abord, nous allons modéliser ce problème, afin d'en proposer une formalisation selon la notation de Graham. Nous utiliserons les données du cas d'application industriel pour définir les plages réalistes de chacun des paramètres de définition du problème afin de générer des jeux de tests. Nous proposerons ensuite plusieurs approches pour sa résolution : d'une part, une heuristique à base de règles de priorités, et d'autre part, une approche par méta-heuristique (le recuit simulé). Ainsi, nous pourrions conclure sur les possibilités de résolution de ce problème.

Nous pouvons définir trois grands objectifs à l'amélioration de la gestion des analyses chromatographiques :

- une gestion de l'ordre de passage des analyses sur les ressources chromatographiques afin de minimiser les retards des analyses ;
- une meilleure occupation des ressources afin de limiter les investissements ;
- la synchronisation de la chromatographie avec le reste de l'analyse physico-chimique.

Le premier objectif sera prioritaire sur le second pour des raisons de performance logistique du site de production, requise dans l'industrie pharmaceutique, afin de ne pas créer de rupture d'approvisionnement en médicament pour le patient. Les autres ressources analytiques étant flexibles et réactives et

la chromatographie ne générant qu'une partie de leur charge, elles pourront s'adapter à un ordonnancement de la chromatographie. Ainsi, nous prenons le parti de programmer d'abord les chromatographies, puis de caler le reste de l'analyse en physico-chimie.

Cette partie peut également être vue comme une démarche d'utilisation de la connaissance en ordonnancement pour résoudre un problème existant dans un système industriel.

L'ensemble des expérimentations de cette partie est lié à un développement interne du Centre Génie Industriel de l'École des Mines d'Albi-Carmaux appelé AMMAC (Aide à la Mise en Main des Analyses Chromatographiques). Cet outil, développé en langage Perl, a permis d'évaluer les différentes méthodes de résolution proposées.

Chapitre 5

Modélisation du problème d'ordonnement d'un laboratoire d'analyses chromatographiques

Nous allons commencer par analyser le problème industriel en vue de sa modélisation. Dans un deuxième temps, nous regarderons plus en détail les aspects théoriques de l'ordonnement nécessaires à la modélisation. Nous concluons alors ce chapitre sur la modélisation de notre problème en termes d'ordonnement et les pistes de résolution choisies.

5.1 Formaliser la réalité industrielle pour établir son modèle en théorie de l'ordonnement

5.1.1 La technologie chromatographique

La chromatographie est une méthode d'analyse physico-chimique qui sépare les constituants d'un mélange (les solutés) par entraînement au moyen d'une phase mobile (liquide ou gaz) le long d'une phase stationnaire (solide ou liquide fixé), grâce à la (ré)partition sélective des solutés entre ces deux phases. Chaque soluté est donc soumis à une force de rétention (exercée par la phase stationnaire) et une force de mobilité (due à la phase mobile). La première chromatographie a été réalisée en 1906 par le botaniste russe Mikhaïl Semenovich Tswett et consistait à séparer les pigments (en grec : « chromat ») d'une feuille d'épinard. Les méthodes chromatographiques peuvent être classées en fonction de la nature physique des phases (mobile et stationnaire). Ainsi, une des techniques les plus connues est la CCM ou Chromatographie sur Couche Mince, qui consiste à la progression d'un solvant par capillarité sur un support ressemblant à une feuille de papier buvard. Parmi les autres techniques chromatographiques, on trouve la chromatographie sur colonne. Dans ce dernier ensemble, les techniques plus courantes sont la Chromatographie en Phase Gazeuse (CPG) et la Chromatographie Liquide Haute Performance (CLHP, ou HPLC en anglais pour High Performance Liquid Chromatography).

Aujourd'hui, ces deux dernières technologies sont particulièrement utilisées en contrôle qualité, du

fait de leur important pouvoir de détection. En effet, elles permettent de doser des composants présents, même en très faible quantité.

Les appareils de chromatographie sur colonne sont constitués d'un système d'injection de l'échantillon, d'une colonne, d'un détecteur et d'un système d'enregistrement et/ou d'analyse des chromatogrammes, comme le montre la figure 5.1.

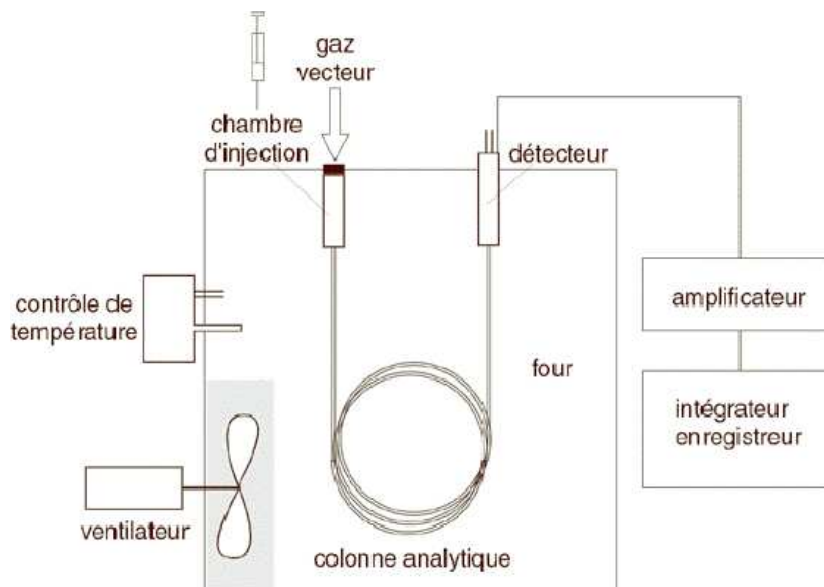


Fig. 5.1 – Schéma de principe d'une chaîne chromatographique (le four et la gestion de la température ne sont pas présents dans toutes les variantes technologiques).

On attribue la découverte de la CPG à A. Martin et R. Synge (1941). Ils reçoivent en 1950 le prix Nobel de chimie pour cette découverte qui bouleversera le monde de l'analyse. Les progrès de l'instrumentation (colonne capillaire, détecteurs...) et sa relative facilité d'emploi font de la CPG une technique d'analyse de routine essentielle dans de nombreux laboratoires. La CPG s'applique à des échantillons gazeux ou susceptibles d'être vaporisés sans décomposition dans l'injecteur. La phase mobile est alors un gaz (hélium, azote, argon ou hydrogène), appelé gaz vecteur, qui balaie en permanence la colonne. Cette dernière, placée dans un four thermostaté, est un tube de faible section enroulé sur lui-même et contenant la phase stationnaire. Un grand choix de détecteurs permet l'analyse sélective et parfois l'identification de mélanges très complexes. Si la phase stationnaire est un liquide non ou peu volatil, possédant des propriétés de solvant vis-à-vis des composés à séparer, on parle de chromatographie gaz-liquide ou chromatographie de partage. Si la phase stationnaire est un solide adsorbant (silice, alumine, zéolites ou autres polymères adsorbants), c'est de la chromatographie gaz-solide ou chromatographie d'adsorption.

Après les travaux de Mikhaïl Semenovitch Tswett, c'est dans un premier temps la chromatographie sur colonne qui prend un essor considérable. Ainsi, Reichstein en 1938 montre le principe de l'élution des composés dans une colonne après leur séparation. En 1952, l'utilité des gradients d'élution est montrée puis, vers les années 1960, la chromatographie par perméation sur gel se développe. On peut situer à 1967, grâce aux travaux de Huber et Huzsman, le début de la chromatographie liquide à haute vitesse, plus tard appelée à juste titre Chromatographie Liquide Haute Performance (CLHP ou HPLC). L'HPLC présente un champ d'application très vaste (molécules sensibles à la chaleur ou de hautes

masses moléculaires) en raison d'un choix important de phases stationnaires et de l'évolution des détecteurs. L'échantillon doit être totalement soluble dans la phase mobile, qui sera appelée solvant d'éluion (solvant ou mélange de solvants). Celui-ci doit être poussé à haute pression afin d'assurer un débit constant dans la colonne et y éviter toute perte de charges. L'HPLC classique fait intervenir des mécanismes d'échange soluté / phase mobile / phase stationnaire, basés sur les coefficients de partage ou d'adsorption selon la nature des phases en présence. On peut également y associer deux types de chromatographie liquide : la chromatographie ionique et la chromatographie d'exclusion.

Dans notre cas d'étude, nous avons deux laboratoires de chromatographie : un laboratoire d'analyses chromatographiques par HPLC et un par CPG. Le fonctionnement de ces deux laboratoires diffère très peu. Nous allons commencer par analyser les différents points du fonctionnement de l'atelier HPLC. Pour l'atelier CPG, nous listerons simplement les différences.

5.1.2 Présentation d'un laboratoire d'analyses chromatographiques par HPLC

5.1.2.1 Le laboratoire est un ensemble de machines parallèles, mais différentes

Ce laboratoire d'analyse comporte plusieurs machines différentes appelées chaînes HPLC. Ces chaînes diffèrent par les options d'analyses qu'elles offrent. Un test chromatographique donné peut être réalisé sur n'importe quelle chaîne compatible avec son protocole, avec un temps de process identique. Un test, dont le protocole analytique prévoit d'appliquer un gradient de température, ne peut être réalisé que sur une machine permettant de faire varier la température en cours d'analyse. D'autres exemples peuvent être proposés avec le type de détecteur requis, le type d'injection nécessaire, la présence d'un four, etc. Une seule machine est utilisée pour la réalisation d'un test.

5.1.2.2 Un test chromatographique nécessite une ressource technique secondaire

Comme nous l'avons vu précédemment, une chromatographie repose sur le principe de la séparation des constituants d'un mélange, via une phase stationnaire contenue dans une colonne chromatographique. La colonne chromatographique n'est pas solidaire d'une chaîne chromatographique. Par analogie, une colonne chromatographique est à la chaîne ce que le foret est à la perceuse : un outil que l'on monte et démonte à volonté. Ceci caractérise la notion de flexibilité d'une chaîne chromatographique : elle peut réaliser beaucoup d'analyses différentes suivant la colonne installée. Chaque type de colonne est disponible en un ou plusieurs exemplaires qui dépendent de leur fréquence d'utilisation. Ainsi, ces ressources secondaires devront être partagées entre les machines.

5.1.2.3 Un test chromatographique requiert un temps de préparation dépendant de la séquence

La colonne chromatographique, installée sur une chaîne pour réaliser des déterminations chromatographiques, nécessite un temps de préparation, appelé « conditionnement de colonne » dans le langage du métier. Ce temps est nécessaire techniquement pour mettre en équilibre la phase mobile (le fluide traversant la colonne) avec la phase stationnaire (le garnissage de la colonne). Cependant, comme il

s'agit d'obtenir un équilibre physico-chimique entre deux entités, une fois l'équilibre atteint, plusieurs tests nécessitant les mêmes conditions d'équilibre peuvent être réalisés en séquence. Ainsi, ce temps de préparation est dépendant de la séquence des déterminations.

Pour ce temps de préparation, deux cas de figure peuvent se produire. Soit l'équilibre est complètement rompu (arrêt de la chaîne, changement de colonne), soit il s'agit d'une évolution d'équilibre (changement de température par exemple). Le second cas existe, mais sera négligé étant donné que le temps nécessaire est relativement faible. À l'opposé, le premier cas est particulièrement long. Il est de l'ordre d'une heure au minimum et de vingt-quatre heures au maximum. En comparaison, le temps de réalisation d'une détermination chromatographique est de l'ordre de quelques dizaines de minutes.

5.1.2.4 Un test chromatographique nécessite l'intervention d'opérateurs humains à certains instants

Pour la réalisation d'une détermination chromatographique, l'intervention d'opérateurs humains (techniciens analytiques) est indispensable :

- Pour le montage de la colonne sur la chaîne, ainsi que pour la préparation de l'échantillon. La préparation de l'échantillon est une activité de paillasse qui ne nécessite pas l'immobilisation d'une ressource chromatographique. Cette activité n'a donc pas d'impact sur notre étude, centrée sur la gestion des ressources chromatographiques. Elle peut être réalisée en temps masqué, pendant le temps de conditionnement de colonne.
- Il peut être nécessaire de valider la fin du conditionnement de colonne par une intervention humaine. Si cette étape de validation humaine n'existe pas, la phase d'analyse proprement dite peut être enchaînée automatiquement, l'ensemble du système analytique étant piloté par un système informatique.
- L'intervention d'un opérateur est nécessaire en fin d'analyse, pour démonter la colonne après son éventuel refroidissement et son nettoyage (similaire à un conditionnement, mais moins long).

Les chaînes et les colonnes chromatographiques peuvent fonctionner 24h/24, week-ends compris, alors que les techniciens ne sont présents que sur des horaires particuliers. Dans notre cas d'application, les horaires sont de 8 heures à 18 heures du lundi au vendredi.

5.1.3 Différence entre les déterminations CPG et HPLC

Nous avons vu que le temps de préparation est dépendant de la séquence, d'où la nécessité de regrouper les tests demandant une même préparation. Cependant, les contraintes de réalisation des regroupements dépendent de la technologie analytique. Pour l'HPLC, la colonne chromatographique utilisée est spécifique du composé analysé (par exemple : dosage du principe actif x). Pour ce type d'analyse, seuls seront possibles des regroupements visant la recherche du même composé. On peut par exemple imaginer le regroupement du dosage du même principe actif dans deux produits finis différents et dans la matière première (vérification de sa pureté).

En revanche, pour la CPG, la politique de regroupement est nettement différente. En effet, la colonne utilisée est spécifique de l'information recherchée et non du composé (par exemple : détermination du titre alcoolique). Dans ce cas de figure, tous les composés pour lesquels un titre alcoolique doit être déterminé vont pouvoir être regroupés.

5.1.4 La gestion des regroupements

Une analyse d'un composé est un ensemble de déterminations (ou tests) à réaliser. Il n'existe pas d'ordre imposé entre les différents tests et plusieurs tests peuvent être réalisés dans le même laps de temps. Un regroupement définit un lot d'échantillons dont les déterminations sont faites par le même opérateur sur les mêmes moyens et de façon séquentielle. Nous allons donc maintenant nous intéresser aux différents niveaux de regroupements qui peuvent être réalisés.

Ces regroupements peuvent être donnés *a priori* du fait d'une règle « métier », auquel cas ils sont imposés au système d'ordonnancement, ou *a posteriori*, auquel cas ils sont proposés par le système d'ordonnancement. L'intérêt d'un regroupement réside dans l'économie de temps de préparation qu'il procure, ainsi que dans l'économie d'échelle générée. En effet, le technicien ne doit pas réaliser plusieurs fois une même séquence, mais une seule fois une séquence un peu plus répétitive. Enfin, nous pouvons remarquer qu'imposer des regroupements *a priori* permet de simplifier le modèle en réduisant le nombre d'entités à ordonnancer.

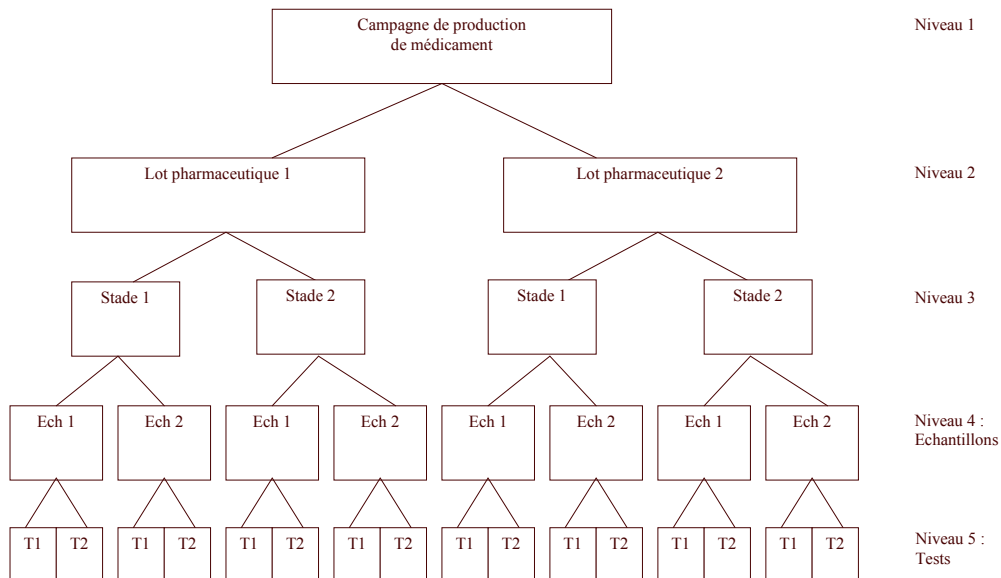


FIG. 5.2 – Décomposition des différents niveaux de gestion des analyses.

Nous pouvons voir, sur la figure 5.2, que la production de médicaments est un ensemble de campagnes de production d'une même formule (pouvant être conditionnée en plusieurs variantes : taille des contenants, langue...). Une campagne de production est un ensemble de lots pharmaceutiques dont la taille est fixée par l'AMM. La production d'un lot pharmaceutique passe par différents stades de production (par exemple : pour réaliser une boîte de comprimés enrobés, les stades sont granulation,

compression, enrobage, conditionnement). Pour le laboratoire de contrôle qualité, un stade de production pourra générer un ensemble d'échantillons par lot pharmaceutique, si l'AMM l'impose. L'analyse est terminée lorsque toutes les déterminations sont réalisées. C'est une partie de ces déterminations qui va être réalisée sur des ressources chromatographiques. On dira ensuite que l'analyse sera conclue lorsque le rapport d'analyse aura été écrit, puis validé.

Pour être complet, il faut bien évidemment ne pas oublier les matières premières qui vont également être contrôlées. Ainsi, une commande peut comporter plusieurs lots fournisseurs. Chaque lot génère un échantillon à analyser. L'analyse sera - comme pour un produit - un ensemble de déterminations dont certaines chromatographiques.

Dans le laboratoire, on observe quatre types de regroupements qui permettent d'optimiser simultanément l'ensemble des ressources :

regroupement de niveau 2 : les échantillons de plusieurs lots fournisseur d'une même matière première ou alors de plusieurs lots pharmaceutiques d'une campagne de production d'un produit fini ;

regroupement de niveau 3 : les échantillons correspondant à plusieurs stades de production pour un même produit (les analyses du comprimé nu et du comprimé enrobé peuvent être faites en même temps) ;

regroupement de niveau 4 : l'ensemble des échantillons correspondant à un stade de production (par exemple : l'échantillon prélevé en début d'opération, puis celui prélevé au début de la deuxième journée de l'opération, puis enfin celui prélevé à la fin de l'opération) ;

regroupement de niveau 5 : parmi l'ensemble des déterminations à réaliser, seules certaines peuvent être regroupées (par exemple : le dosage du principe actif dans un produit fini avec le dosage d'un lot de matière première de ce même principe actif, ou encore le dosage par CPG des arômes présents dans plusieurs produits finis différents).

Une question se pose également concernant la lecture intermédiaire des résultats lors des regroupements en chromatographie. Par exemple, lors d'un regroupement de trois tests chromatographiques, pouvons-nous avoir le résultat du premier test dès sa fin ou faut-il attendre la fin des trois tests ? La réponse dépend de l'existence d'étapes de validation intermédiaire ou non. En effet, pour qu'une analyse chromatographique soit considérée comme valable dans le contexte pharmaceutique, il faut qu'une mesure faite avant et après n'ait pas eu une dérive supérieure à un seuil donné. Si la mesure de cette dérive est faite entre chacun des trois tests, alors nous pouvons utiliser les résultats du test dès sa fin ; sinon il faut attendre la fin des trois pour pouvoir le faire. Il en va de même pour le retest. Dans ce cas là, il s'agit de savoir s'il faut tout recommencer du début ou simplement le dernier test. Cependant, des méthodes (comme le bracketting) peuvent permettre de nuancer ces affirmations et d'accepter des tests alors que la dérive est supérieure au seuil, mais satisfait d'autres critères. En conclusion de ce point, nous considérerons les tests exploitables dès leur fin, sans nécessairement attendre la fin du regroupement.

5.1.5 Diversité et volumétrie des analyses chromatographiques : élément sur la taille du problème à résoudre

Ce problème d'ordonnement existe sous cette forme pour deux raisons : (1) la volumétrie des analyses et (2) la diversité des analyses.

Notre cas d'application industriel est une usine de production de médicaments qui produit plus de 110 millions d'unités annuellement, sur environ 150 formules, avec environ 500 matières premières différentes (cf. 1.3). Cela représente de l'ordre de 6 000 analyses annuelles, soit donc une moyenne quotidienne de 25 analyses, réparties de façon équivalente entre les composants et les produits. Parmi les analyses actuellement réalisées par le laboratoire de contrôle qualité de ce site de production, une analyse sur deux comporte au moins une détermination réalisée via une technique chromatographique. En outre, il est clair que la pérennité de cette problématique - et même son intensification - sont garanties en raison de plusieurs aspects :

technologiques : à l'heure actuelle, certaines techniques analytiques à base de chromatographie n'ont pas d'alternative (par exemple : la CPG à colonne capillaire et injection head-space est la seule technique disponible aujourd'hui pour mesurer précisément la teneur en solvant résiduel d'un composé). Par ailleurs, des techniques de contrôle alternatives à la chromatographie sur colonnes (comme l'électrophorèse capillaire ou la chromatographie couche mince sous haute pression) ont du mal à émerger industriellement (elles sont peu reconnues par la pharmacopée européenne), alors qu'elles ne poseraient pas de problème de temps de préparation importants ;

réglementaires : lors de l'enregistrement d'un nouveau médicament, les techniques de contrôle doivent être au faite de l'évolution de la science, ce qui implique par nature une non-standardisation des procédés de contrôle.

Les laboratoires de chromatographie de notre cas d'application industriel comportent de l'ordre d'une dizaine de machines pour chaque technologie. Pour la CPG, une vingtaine de colonnes chromatographiques sont nécessaires alors que pour l'HPLC, l'ordre de grandeur est la centaine. Par semaine, l'ordre de grandeur des déterminations chromatographiques réalisées est supérieur à une centaine. Ainsi, en pratique, les problèmes d'ordonnement à résoudre comportent une dizaine de machines, une centaine d'opérations réparties en plusieurs dizaines de jobs.

5.1.6 Synthèse du problème industriel

Il s'agit d'un problème d'ordonnement à machines parallèles identiques flexibles, avec des temps de préparation importants dépendant de la séquence. Des ressources secondaires doivent être considérées, telles que les colonnes chromatographiques et les techniciens. Des regroupements de tests sont possibles suivant un certain nombre de règles.

Cette problématique est générique des environnements industriels utilisant la technologie chromatographique, sans pouvoir dédier les ressources à la réalisation d'un seul type d'analyse. Le couplage de la diversité des produits et des analyses avec l'importante utilisation de cette technologie se trouvera donc principalement dans le secteur pharmaceutique et la chimie fine. À l'avenir, les secteurs cosmétiques et agro-alimentaires pourraient être concernés, selon l'évolution de la réglementation.

5.2 Ordonnement : théorie et pratique sur notre problème

L'ordonnement est une discipline scientifique étudiée depuis les années 1950 (S. Johnson, 1954; J. Jackson, 1955) qui « consiste à organiser dans le temps, la réalisation d'un ensemble de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement, etc.) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises par les tâches » (P. Lopez et F. Roubellat, 2001).

5.2.1 Optimisation

Les problèmes d'ordonnement font partie du domaine des mathématiques appelé optimisation. L'optimisation cherche à déterminer une solution minimisant (ou maximisant) un critère (ou fonction objectif ou fonction économique). Cette solution est définie par un ensemble de variables qui peuvent être d'état (i.e. décrivant un système) ou de commande (i.e. représentant une action pouvant être réalisée sur le système pour influencer sur son comportement). Ces variables peuvent être définies sur des domaines continus ou sur des domaines discrets. Si le domaine de définition est discret, on parle alors d'optimisation combinatoire, l'ensemble des solutions est énumérable. Dans le cas où certaines variables sont reliées entre elles par des relations, on parle de contraintes. Les problèmes d'ordonnement font donc partie des problèmes d'optimisation combinatoires sous contraintes. Au sens de la théorie de la complexité, beaucoup de problèmes d'ordonnement sont de type \mathcal{NP} -difficile. Cela signifie « qu'il n'existe pas de méthode de résolution efficace, i.e. d'algorithme polynomial pour les résoudre [...] ce que l'on peut rechercher, c'est obtenir une solution aussi proche que possible de l'optimum en temps polynomial » (G. Yugma, 2003).

5.2.2 Panorama des méthodes de résolution

Les méthodes de résolution des problèmes d'ordonnement proviennent de plusieurs courants scientifiques.

D'une part, la recherche opérationnelle est à l'origine de nombreuses méthodes de résolution. Parmi elles, nous trouvons les méthodes exactes, comme la programmation dynamique ou la Séparation et Évaluation Progressive (S.E.P. ou *branch-and-bound*). Les heuristiques constructives (algorithmes gloutons) en font également partie, parmi lesquelles nous trouvons les algorithmes de liste et les règles de priorités. Les heuristiques constructives sont des méthodes itératives qui génèrent la solution par ajout d'éléments à chaque itération. La non-remise en cause d'un choix se traduit par le terme de myopie ou le caractère glouton de l'algorithme. Ainsi, les algorithmes de listes ont pour principe la création *a priori* d'une liste ordonnée des opérations, puis de leur ordonnancement suivant l'ordre établi. Les règles de priorités sont basées sur l'existence d'une liste de priorités mise à jour à chaque étape de l'algorithme. Enfin, nous pouvons conclure la revue des méthodes issues de la recherche opérationnelle par les méthodes de recherche locale. L'idée de ces méthodes est de partir d'une solution réalisable, puis de la modifier progressivement jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait. La subtilité de ces méthodes est basée sur la génération d'une solution voisine, ainsi que les règles d'acceptation ou non d'un voisin. Nous trouvons dans ce cadre la méthode de descente, la recherche tabou, le recuit simulé... Historiquement, l'ordonnement a commencé par utiliser des algorithmes gloutons (dès les années 1950), puis les méthodes exactes (à partir des années 1960) et enfin les méthodes de recherche locale (à partir des années 1970 et 1980). Aujourd'hui encore, toutes ces techniques font l'objet de recherches.

D'autre part, les problèmes d'ordonnement ont été étudiés au moyen de méthodes issues de l'intelligence artificielle. Nous retrouvons dans ce cas de figure les méthodes de propagation de contraintes à partir des années 1970 (J. Erschler, 1976), ainsi que les algorithmes évolutionnaires depuis les années 1960 et 1970. Dans cette dernière catégorie, nous pouvons citer les algorithmes génétiques, les colonies de fourmis, les essais particuliers... Plus récemment, les systèmes multi-agents (Intelligence Artificielle Distribuée) sont utilisés pour résoudre les problèmes d'ordonnement (E. Tranvouez, 2001).

Les méthodes de type recherche locale et de type algorithmes évolutionnaires sont appelées génériquement les méta-heuristiques. Les heuristiques et les méta-heuristiques appartiennent à l'ensemble des méthodes approchées.

Plusieurs états de l'art de l'ensemble des techniques récentes en ordonnancement existent. Par exemple, deux journées d'études du GDR Automatique à Toulouse en 1994 sur le thème « Ordonnancement et entreprise : applications concrètes et outils pour le futur » (P. Baptiste et F. Roubellat, 1994), ou encore l'ouvrage sur l'ordonnancement de la production de P. Lopez et F. Roubellat (2001), etc.

5.2.3 Panorama des principes de modélisation existants

Afin de pouvoir modéliser notre problème d'ordonnancement, un premier état de l'art montre que plusieurs possibilités existent. Nous retenons trois angles de vue pour la présentation de cet état de l'art, mais nous commencerons cependant par des généralités sur les problèmes d'ordonnancement à machines parallèles.

5.2.3.1 Problèmes à machines parallèles

L'état de l'art de T. Cheng et C. Sin (1990) concernant les problèmes d'ordonnancement à machines parallèles propose notamment un panorama des méthodes étudiées depuis les algorithmes à base de règles simples comme *EDD*, *SPT* et *Slack*. La thèse de C. Flipo-Dhaenens (1998) présente un panorama complet des problèmes à machines parallèles, avant de s'intéresser plus particulièrement à un problème à machines non reliées avec des temps de préparation et de le résoudre par une méthode exacte, puis par diverses heuristiques. Un autre panorama a été réalisé par F. Perraud-Échalier (1991) dans lequel on peut voir l'utilisation de plusieurs heuristiques (*EDD*, *Slack*, *SPT*, *LPT*) et le recuit simulé pour des problèmes à machines parallèles identiques ou différentes et avec ou sans temps de préparation. L. M. Aguilera (1993) a également étudié le problème d'ordonnancement à machines parallèles avec coûts de changements. Il propose plusieurs heuristiques (Clarke-Wright, Gaskel-Yellow, Parker-Deanes-Holmes, Golden-Magnanti-Nguyen, Plus proche ville, $2 - Opt$) et une méthode de séparation-évaluation, étant donné que ces méthodes ont été conçues pour les problèmes du véhicule et du voyageur de commerce multiple auxquels peut se ramener le problème à machines parallèles avec coûts de changements.

5.2.3.2 Machines parallèles non reliées (noté R_m selon Graham)

Les machines sont dites non-reliées si la durée d'exécution d'une tâche sur les machines ne sont ni égales, ni proportionnelles. Un problème à machines flexibles peut être considéré comme un problème à machines non reliées dans lesquels la durée p_i de la tâche i a une valeur finie si la machine est éligible et infinie sinon (très grand en pratique), tel que le propose M. Pinedo (1995). Les travaux de M. Weng et al. (2001) proposent une série d'heuristiques à base de règles pour traiter le problème à machines parallèles non-reliées, avec des set-up pour le critère de la moyenne pondérée des dates de fin d'opérations : machine pour laquelle le coût du job (set-up plus temps opératoire) est le plus faible, jobs choisis par *LPT* affectés à la machine où le temps opératoire (ou le temps opératoire plus le set-up) est le plus faible. Pour minimiser la somme pondérée des pénalités d'avance et de retard, J. Bank et F.

Werner (2001) proposent des heuristiques de liste : choix des jobs selon des critères liés à la marge ou à la date d'arrivée ; choix de la machine par un critère combinant la somme des temps opératoires des opérations pouvant lui être affectées et le C_{max} de cet ensemble de jobs en les triant selon leur dates d'arrivées croissantes. Ils proposent aussi des méta-heuristiques (recuit simulé, seuil d'acceptation). Une approche optimale pour le cas sans set-up a été étudié par C.-F. Liaw et al. (2003) pour minimiser la somme des retards pondérés en utilisant un algorithme de *branch-and-bound*. Le temps de calcul devient prohibitif pour des problèmes de taille modeste, en comparaison de ceux que nous souhaitons résoudre. Notre problème se rapproche également du problème de type $R_m|r_j, d_j, s_{i,j,k}, M_j|critère$ étudié par S. Kedad-Sidhoum (1997), pour lequel elle a proposé une approche heuristique (règle de priorité liée à la polyvalence des machines pour des opérations) et plusieurs méta-heuristiques (recuit, tabou, génétique, évolutionnaire).

5.2.3.3 Machines parallèles identiques (noté P_m selon Graham) flexibles

Notre problème peut être abordé comme un problème à machines parallèles identiques sur lesquelles une contrainte modélise le fait qu'un job ne puisse être réalisé que par une machine d'un sous-ensemble de l'ensemble des machines. Ce dernier élément de modélisation s'exprime selon trois terminologies différentes : contraintes d'éligibilité (G. Centeno et R. Armacost, 1997) ; flexibilité (G. Vairaktarakis et X. Cai, 2003) ; machines multi-objectifs (multipurpose machine, noté MPM par Brucker (P. Brucker, 1998)).

M. Pinedo (1995) propose des heuristiques basées sur les concepts de job (ou opération) le moins flexible et machine la moins flexible. En outre, Y. Lee et M. Pinedo (1997) proposent, dans le cas de machines parallèles identiques sans contrainte de flexibilité, mais avec une problématique de set-up, une résolution par une heuristique à base de règles suivie par une méta-heuristique (recuit simulé) pour minimiser la somme des retards pondérés. Pour ce qui est de l'heuristique, au-delà des règles classiques *EDD* et *WSPT*, ils introduisent une règle appelée *ATCS* (Apparent Tardiness Cost with Set-ups) qui prend en compte l'influence du set-up pour construire la séquence. Cette règle *ATCS* provient des travaux de A. Vepsalainen et T. Morton (1987), qui ont proposé la règle *ATC* en montrant sa grande efficacité sur le problème $1||\sum \omega_i T_i$. Cette approche a été améliorée par les travaux de Y. Park et al. (2000) en rajoutant des paramètres à l'heuristique et en la couplant avec une approche par réseau de neurones pour la paramétrer.

En dehors de ces approches, V. Gabrel (1995) a abordé le problème P_m -flexible par un algorithme basé sur le graphe de compatibilité entre jobs. Le problème P_m avec set-up et arrivée dynamiques des jobs a été étudié par I. Ovacik et R. Uzsoy (1995) pour le problème industriel de l'étape finale du contrôle qualité, lors de la fabrication de semi-conducteurs. Ils ont proposé plusieurs algorithmes, cherchant à minimiser le retard maximum, basés sur la résolution en série de sous-problèmes à une machine de façon optimale (par un algorithme de type *branch-and-bound*). Ces algorithmes sont proches de la procédure de *shifting bottleneck*. En ce qui concerne les méthodes optimales, S. Webster et M. Azizoglu (2001) proposent une méthode de résolution des problèmes P_m avec set-up en utilisant la programmation dynamique pour minimiser la somme pondérée des dates de fin des jobs (flowtime). F. Yalaoui (2000) a proposé plusieurs approches exactes pour résoudre des problèmes P_m . Z. L. Chen et W. B. Powell (2003) ont proposé des algorithmes *branch-and-bound* avec génération de colonnes pour un problème d'ordonnancement P_m avec temps de préparation dépendant de la famille et pouvant dépendre ou non de la séquence, l'objectif étant soit la somme pondérée des dates de fin, soit la somme pondérée du nombre de jobs en retard.

La flexibilité des machines a été abordée par G. Vairaktarakis et X. Cai (2003) pour la minimisation de la date de fin du dernier job (makespan), sur des jeux de données où ils paramètrent la flexibilité des machines. Diverses heuristiques de liste tenant compte de la flexibilité de chaque machine au moyen d'un calcul comprenant la charge déjà affectée et la charge potentiellement affectable (en la prenant en compte soit totalement, soit par répartition sur les machines éligibles d'un même job) sont utilisées. Ils concluent sur le fait que l'heuristique considérant la charge potentielle totale est performante mais peu robuste, alors que celle utilisant le concept de charge potentielle répartie sur toutes les machines éligibles de chaque job donne des résultats proches de l'optimum.

L'ordonnancement d'une des étapes du contrôle qualité en production de semi-conducteurs a été étudié par G. Centeno et R. Armacost (1997) qui proposent un algorithme à base de règles de priorité pour le cas des machines parallèles identiques flexibles avec arrivée dynamique des jobs, leur critère étant la valeur du retard maximum. La méthode proposée est basée sur les travaux de Y. Lee et M. Pinedo (1997) : job le moins flexible / machine la moins flexible, sans pour autant préciser leurs définitions de ces deux concepts.

En ce qui concerne les méta-heuristiques, les travaux de D.-W. Kim et al. (2002) sur les machines parallèles non-relées avec des temps de set-up et la somme des retards en critère nous permettent de voir les performances d'un algorithme de recuit simulé sur des problèmes très proches du nôtre, tout en proposant plusieurs concepts pour la définition des voisinages. Nous noterons également que F. Serifoglu et G. Ulusoy (1999) ont proposé des algorithmes génétiques pour résoudre le problème à machines parallèles identiques avec temps de set-up, afin de minimiser la somme pondérée des pénalités d'avance et de retard. D. H. Eom et al. (2002) étudient quant à eux un problème à machines parallèles identiques avec des familles de jobs et des temps de préparation dépendant de la séquence, avec pour but de minimiser la somme des retards. Ce problème est résolu au moyen d'une heuristique à trois phases. Les deux premières groupent les jobs selon les règles de priorité *EDD* (phase 1) puis *ATCS* et méthode tabou (phase 2). Ensuite, une troisième phase permet d'affecter les groupes obtenus sur les machines (threshold value et look-ahead parameter). Une autre heuristique est proposée par H. J. Shin et V. J. Leon (2004) pour le même problème, basée sur les problèmes de bin-packing : *Multifit*. A. S. Mendes et al. (2002) ont comparé deux méta-heuristiques pour résoudre des problèmes d'ordonnancement issus des industries papetières, chimiques et textiles. Il s'agit de problèmes à machines parallèles identiques avec temps de préparation dépendant de la séquence et avec l'objectif de minimiser la date de fin du dernier job réalisé. Ils ont comparé une recherche tabou et une approche mimétique (qui combine un algorithme évolutionnaire avec une méthode de recherche locale). L'importance relative du temps de préparation est un facteur discriminant dans le choix de la méthode. La recherche tabou se révèle plus adaptée que l'approche mimétique pour les problèmes avec un temps de préparation important. Une approche par hybridation d'algorithmes génétiques avec des règles de priorité a été étudiée par J. W. Fowler et al. (2003). L'algorithme génétique est utilisé pour affecter les jobs aux machines alors que les règles de priorité (*SPT*, *Slack*, *ATCS*) sont utilisées pour ordonnancer les jobs sur une machine donnée.

5.2.3.4 Ressources secondaires

Une des contraintes de notre problème est la présence de ressources secondaires nécessaires à la réalisation des analyses : les techniciens et les colonnes ; la ressource principale étant les chaînes chromatographiques. J. Blazewicz et al. (1983) proposent un état de l'art sur l'ordonnancement avec

contraintes de ressources. En effet, ils analysent que de nombreux problèmes d'ordonnement ne peuvent se résumer à un seul type de ressource rare. Il est donc nécessaire de considérer des contraintes de ressources additionnelles, dont ils proposent une classification. Celle-ci définit plusieurs catégories de ressources additionnelles selon que ces ressources sont en nombre constant ou non, que leur capacité est constante ou non et enfin que leur réquisition admet une borne supérieure constante ou non. Cette classification s'intègre dans la notation de Graham au sein du champ β via la notation « res », suivie des trois paramètres présentés précédemment. Nous noterons enfin que ce formalisme ne permet pas de représenter toutes les configurations de problèmes.

La présence de ressources secondaires pour un problème à machines parallèles est étudiée par R. Daniels et al. (1996, 1997) et par R. Daniels et al. (1999) sous le nom de *parallel machine flexible resource scheduling problem*. Ils se placent dans le cas d'un ensemble de cellules parallèles contenant chacune une machine et partageant une ressource commune (pouvant être des opérateurs polyvalents), dont la distribution influe sur le temps opératoire des opérations (plus une cellule reçoit de ressource et plus les temps opératoires de ses jobs seront courts). Ils résolvent ce type de problème pour minimiser le makespan, en utilisant des heuristiques à base de règles, ainsi que des algorithmes de recuit simulé. En outre, P. C. Hu (2004) étudie le problème dit de « l'ordonnement avec affectation d'opérateurs » (*worker assignment scheduling problem*) dans un contexte de machines parallèles identiques avec des jobs non-préemptifs. L'affectation d'un opérateur supplémentaire a pour effet de diminuer le temps opératoire du job. L'ordonnement des jobs est effectué au moyen de règles de priorité (*SPT*, *EDD*, *Slack*), alors que les opérateurs sont affectés selon la règle de la plus grande contribution marginale afin de minimiser la somme des retards. Dans les travaux de H. Kellerer et V. A. Strusevich (2004), la problématique des ressources secondaires a été abordée dans le cas de machines parallèles dédiées. Chaque job connaît au départ la seule machine sur laquelle il peut être réalisé et une ou plusieurs ressources renouvelables sont partagées entre les machines.

P. Mauguère et al. (2003) font apparaître des types de contraintes concernant la disponibilité des ressources. Ils distinguent les problèmes sécables (les opérations peuvent être interrompues lors de leur exécution par une interruption de la machine) ou non. Cette notion de sécabilité rattachée aux opérations est équivalente à la notion de période d'indisponibilité traversable ou non par une opération. Dans notre cas, certaines de ces périodes d'indisponibilité sont traversables par une opération (les créneaux de nuit), alors que d'autres sont non-traversables (la maintenance des machines).

5.2.4 Modélisation du problème

Suite à la présentation de l'ensemble des éléments du problème et à la lumière du panorama des principes de modélisation existants, nous allons maintenant en déduire une modélisation en termes de problème d'ordonnement.

L'analyse d'un échantillon (un job) nécessite une ou plusieurs déterminations chromatographiques (une ou plusieurs opérations). Il n'y a pas d'ordre entre les opérations (gammas libres). Un job est terminé quand toutes ses opérations le sont. Plusieurs opérations d'un job peuvent être réalisées simultanément.

Un job correspond à l'analyse des échantillons d'un lot pharmaceutique à un stade de production donné. La date de disponibilité au plus tôt (« release date » en anglais) est la date de production ou de livraison (cas des matières premières) plus un délai pour la constitution de l'échantillon. La date de

besoin (« due date » en anglais) est soit une date imposée par la production du stade suivant (exemple des matières premières), soit une date de besoin calculée d'après la prévision de consommation du stock de produit fini. Un job peut résulter du regroupement d'échantillons de lots pharmaceutiques ou d'échantillons de stades de production différents pour un même lot pharmaceutique. Auquel cas, la date de disponibilité est le maximum des dates de disponibilité des échantillons, et la date de besoin est le minimum des dates de besoin des échantillons. Cette modélisation d'un regroupement comme un job revient à imposer *a priori* un regroupement que l'algorithme d'ordonnancement pourrait être amené à proposer en considérant séparément chaque échantillon.

D'après la structure de l'atelier, nous pouvons le modéliser avec des machines parallèles. Cependant, ces machines ne sont pas toutes équivalentes entre elles, ce qui nous conduit à un problème de machines parallèles à usages multiples, i.e. où une opération ne peut être réalisée que sur un sous-ensemble de machines. Il faut toutefois noter que les machines pouvant réaliser une détermination la réaliseront toutes avec la même performance : les machines éligibles sont identiques.

Le critère retenu est la minimisation de la somme des retards des jobs.

Nous devons ensuite prendre en compte plusieurs types de contraintes supplémentaires :

- les colonnes en quantité limitée pour chaque type peuvent être montées indifféremment sur toutes les machines acceptant leur type ;
- la durée des interventions humaines est négligeable par rapport à la durée de la détermination. Toutefois, à l'intérieur d'un calendrier d'ouverture du laboratoire, des points d'intervention humaine associés aux opérations doivent avoir lieu ;
- deux déterminations utilisant une même colonne sur un même type de machine et un même solvant appartiennent à une même famille. Deux opérations de la même famille seront enchaînées sans préparation. Un temps de préparation est une valeur prédéfinie attachée à la famille de l'opération à réaliser.

La notation de Graham comprend trois champs $\alpha|\beta|\gamma$. α correspond à l'organisation des ressources, β décrit les contraintes et les caractéristiques du système, γ précise le critère d'optimisation. Nous pouvons résumer l'ensemble de cette modélisation selon la notation de Graham :

$$P_m|r_i, d_i, p_{i,j}, M_{i,j}, \text{colonnes, techniciens, } s_{k,l}, F_q | \sum T_i$$

Avec les notations suivantes classiques en ordonnancement, correspondant au job J_i :

P_m m machines identiques en parallèle

r_i date de disponibilité de J_i

d_i date de besoin de J_i

$p_{i,j}$ durée opératoire de l'opération $O_{i,j}$ du job J_i

$M_{i,j}$ liste des machines éligibles pour l'opération $O_{i,j}$ du job J_i

colonnes contrainte de disponibilité de la ressource secondaire colonnes

techniciens contrainte de rendez-vous d'opérations avec la ressource secondaire techniciens

$s_{k,l}$ temps de préparation entre une opération k et une opération l

F_q existence de familles d'opérations

Cette modélisation aboutit à un problème \mathcal{NP} -difficile (cf. 5.2.1) étant donné que le sous-problème $1||\sum T_i$ est \mathcal{NP} -difficile (J. Du et J. Y.-T. Leung, 1990). Nous allons procéder à sa résolution dans les chapitres suivants.

5.2.5 Méthodes retenues pour la résolution de ce problème

Aujourd'hui, les méthodes exactes nécessitent un temps de calcul qui rend impraticable leur utilisation sur des problèmes de la taille de ceux rencontrés industriellement. Par exemple, F. Yalaoui (2000) résout par *branch-and-bound* des problèmes $P_m || \sum T_i$ avec 15 tâches sur 4 machines en un temps processeur de l'ordre de 5 minutes et avec 30 tâches sur 2 machines en un temps processeur d'environ 2 minutes, en utilisant une station de travail performante (HP J400 biprocesseur, 1 Go de mémoire, codage en C). Nous pouvons également voir que G. Vairaktarakis et X. Cai (2003) font le même type de constat. À partir de 10 machines et une centaine d'opérations, le problème est actuellement insurmontable pour les approches par programmation en nombres entiers ou par programmation dynamique. L'utilisation de l'approche par heuristiques est alors incontournable.

Nous pouvons donc voir dans l'état de l'art réalisé que les principales approches pour résoudre des problèmes à machines parallèles sont d'une part, les heuristiques à base de règles et d'autre part, les méta-heuristiques. Pour les heuristiques à base de règles, outre les règles très générales (*EDD*, *SPT*, *Slack...*), des règles spécialisées ont été proposées, telles que *LFO – LFM*, *ATC* et *ATCS*. Pour les méta-heuristiques, toutes les techniques classiques ont été essayées et apportent des résultats intéressants.

Nous retenons donc ces deux approches pour la suite de nos investigations, étant donné la taille de notre problème, le grand nombre de contraintes à prendre en compte et la nécessité industrielle d'application de nos résultats.

Chapitre 6

Résolution par heuristiques à base de règles de priorité

6.1 État de l'art sur l'ordonnement à base de règles de priorité

Une règle de priorité (dispatching rule, scheduling rule, sequencing rule, priority rule) est, selon K. Bhaskaran et M. Pinedo (1992), une procédure qui permet de déterminer de façon logique la valeur d'un attribut de priorité affectant aux jobs, afin de sélectionner un job pour être réalisé sur une machine qui vient d'être libérée.

D. Boucon (1991) propose plusieurs classements de ces règles de priorité :

Règles locales / globales : une règle locale prend en considération des informations sur la file d'attente dans laquelle se trouve l'élément sur lequel le calcul de priorité est effectué (ex : *SPT*), alors qu'une règle globale prend en compte des informations concernant l'ensemble du système de production.

Règles statiques / dynamique : une règle statique affecte à l'élément concerné (job, opération...) une priorité qui sera constante tout au long de la file d'attente (ex : *FIFO*, *SPT*), alors qu'une règle dynamique fait évoluer cette priorité dans le temps.

Règles simples / complexes : une règle peut prendre en considération des informations basiques (comme sa durée pour *SPT*) ou des informations plus élaborées (comme la charge prévisionnelle d'une machine).

Selon les paramètres de la règle : les règles de priorité peuvent prendre en compte des notions de durée, de délai, de coût et des combinaisons entre ces notions.

Pour pouvoir parler de choix de règles de priorité, il est nécessaire de faire référence à un (ou plusieurs critères) à satisfaire. Les critères peuvent porter sur des notions relatives aux :

En-cours : temps de cycle (moyen, maximum), temps opératoires des opérations non terminées (work remaining), temps opératoire des opérations terminées (work completed), temps de cycle moyen sur somme des durées opératoires, date de fin de la dernière opération (makespan), temps passé en file d'attente (moyen, max...), charge des machines (moyen, indicateur d'équilibrage de charge pour la machine ou l'atelier, indicateur d'équilibrage de la file d'attente...), nombre de pièces en attente, nombre maximum de pièces dans le système, nombre moyen de pièces dans l'atelier...

Dates au plus tard : retard algébrique (*lateness*) (moyen, max...), nombre de pièces en retard, taux de pièces en avance, taux de pièces achevées à temps, retard vrai (*tardiness*) (moyen, max...), retard vrai conditionnel, avance (*earliness*)...

Coûts : somme des coûts des pièces, somme des coûts des retards, somme moyen de l'encours financier...

Ainsi, de nombreux critères existent et sont d'ailleurs pour partie corrélés entre eux.

S. Panwalkar et W. Iskander (1977) ont proposé une liste de 113 règles de priorité qui peuvent être utilisées en ordonnancement. De nombreuses autres ont été proposées, en liaison directe avec des problèmes particuliers. Ainsi, comme nous l'avons vu, *ATC*, *ATCS*, *LFO – LFM* ont été proposées pour des problèmes à machines parallèles.

D. Boucon (1991) affirme qu'« il n'a pas été possible de définir de zones significatives dans l'espace des paramètres de caractérisation [des problèmes] où une ou plusieurs règles de priorité soient les meilleures pour un critère donné ».

Ainsi, la conclusion de cet état de l'art est que nous ne pouvons pas définir *a priori* de règle de priorité adaptée à notre problème d'ordonnancement. Nous allons donc maintenant procéder à la recherche et l'évaluation de règles pertinentes pour notre problème.

6.2 Notations

Dans la suite du texte, nous utiliserons les notations suivantes :

$O_{i,j}$ j^e opération du job J_i de durée $p_{i,j}$, de set-up $s_{i,j}$, de date de disponibilité r_i et de date de besoin d_i

$t_{i,j}$ date de début de $O_{i,j}$

$c_{i,j}$ date de fin de $O_{i,j}$

$ME_{i,j}$ liste des machines éligibles pour l'opération $O_{i,j}$

T_m date de disponibilité de la machine m vues les opérations déjà affectées dessus

CP_m charge potentielle de la machine m

L_m liste des opérations réalisables sur la machine m

A_m liste des affectations possibles sur la machine m

REG règle de priorité sur les affectations possibles

6.3 Algorithme à base de règles de priorité

Pour évaluer différentes règles de priorité, nous proposons l'algorithme 1.

T_m représente la date de disponibilité au plus tôt d'une machine, vues les opérations qui lui sont affectées. Durant la résolution, selon la valeur prise par T_m , une opération $O_{i,j}$ change de statut pour

Alg. 1 HEURISTIQUE PAR RÈGLE DE PRIORITÉ (RÈGLE DE PRIORITÉ : REG, DESCRIPTION DE L'ATELIER ET DE LA CHARGE À AFFECTER)

– \therefore – A est l'ensemble des couples (opération, machine) qui peuvent être affectés à un instant donné, i.e. pour lesquels l'opération est disponible sur la machine (date courante postérieure à la date de disponibilité de l'opération)

$A \leftarrow \emptyset$ – \therefore – à l'initialisation aucun couple n'est affecté

– \therefore – L d'une machine (L_m) sera l'ensemble des opérations éligibles par la machine m

– \therefore – T d'une machine (T_m) est l'instant auquel une machine et au moins une opération sont disponibles simultanément

Pour toutes les machines **Faire**

$T_m \leftarrow 0$ – \therefore – Initialisation des instants à 0 pour toutes les machines

$L_m \leftarrow$ l'ensemble des opérations éligibles sur la machine m

$CP_m \leftarrow$ la somme des durées opératoires de toutes les opérations pouvant être réalisées sur la machine m

Fin Pour

Tant Que (des opérations restent à affecter) **Faire**

Remplir A avec tous les couples (opération, machine) pour les opérations qui sont disponibles (i.e. telles que $r_{i,j} < T_m$) sur leurs machines éligibles.

Pour chacun des couples, calculer les dates de début et de fin potentielles si l'opération était affectée sur la machine. Le calcul des dates de début et de fin potentielles tient compte de la gestion des ressources secondaires (réservation des colonnes et rendez-vous avec les techniciens).

Choisir un couple ($O_{i,j}$, m) dans A selon une règle REG.

Affecter l'opération $O_{i,j}$ sur la machine m .

Supprimer l'opération $O_{i,j}$ de la liste L de toutes les machines.

$T_m \leftarrow$ date de fin de $O_{i,j}$ sur m .

$T_m \leftarrow \text{Max}(T_m, \text{Min}(r_i/O_{i,j} \in L_m))$ – \therefore – Pour la machine m , passage à l'instant utile suivant, i.e. la fin d'occupation de la machine ou la première date de disponibilité d'une opération éligible.

Vider A .

$CP_k \leftarrow CP_k - d_{i,j}$, pour toutes les machines k différentes de m .

Fin Tant Que

Retourner (Pour chaque machine, toutes les opérations qui lui sont affectées avec leurs dates de début et de fin d'affectation)

une machine m donnée. Elle passe du statut *réalisable* ($O_{i,j} \in L_m$ tant que $r_i < T_m$) au statut *affectable* ($O_{i,j} \in A$ et $O_{i,j} \notin L_m$ lorsque $r_i \geq T_m$) puis au statut *affecté* ($\forall m, O_{i,j} \notin A$ et $O_{i,j} \notin L_m$).

À chaque boucle, l'ensemble des opérations affectables est déterminé par machine. Pour chaque affectation possible d'une opération sur une machine, une date de début potentielle et une date de fin potentielle sont déterminées, en supposant que cette affectation soit la prochaine choisie. L'une de ces affectations est ensuite choisie selon une règle REG pour être réellement affectée.

Les spécificités des contraintes du problème sont intégrées dans le calcul des dates potentielles pour le placement d'une opération. Pour affecter une opération, il faut assurer la disponibilité d'une colonne, d'un technicien en début de set-up, voire également en fin de set-up, ce qui induit des trous de charge dans l'utilisation des machines.

6.4 Règles proposées

L'objectif de cette expérimentation est de tester la performance relative de différentes règles *REG*, selon la dureté des différents types de contraintes du problème : éligibilité des machines et temps de set-up.

Plusieurs règles sont apparues comme pertinentes à l'issue de la revue bibliographique :

- machine la moins flexible (*MinCP_m*, machine pour laquelle la charge totale qui peut lui être potentiellement affectée est la plus faible), puis opération la moins flexible (*MinCard(ME_{i,j})*, opération qui peut être réalisée sur le plus petit ensemble de machines identiques) ;
- opération la moins flexible, puis machine la moins flexible ;
- pour la première machine libre, choix de l'opération par *MinEDD* (Earliest Due Date, tri par dates de besoin croissantes) ;
- pour la première machine libre, choix de l'opération par *MaxATC* (Apparent Tardiness Cost, Coût de Retard Apparent, cf. équation 6.1) ;
- pour la première machine libre, choix de l'opération par *MaxATCS* (ATC with Set-ups, cf. équation 6.2) ;
- pour la première machine libre, choix aléatoire de l'opération parmi celles affectables. Cette règle nous permet de mesurer l'apport des autres règles en regard d'un choix aléatoire.

En outre, nous proposons d'autres règles, afin d'y intégrer les contraintes propres à notre problème :

- pour la première machine libre, opération la moins flexible ;
- *MinEDD*, puis *MaxTRS* (cf. équation (6.3)) ;
- *MaxTRS*, puis *MinEDD* ;
- pour la première machine libre, *MaxATCTRS* ;
- pour la première machine libre, *MaxATCTRS F*.

Notre proposition (M. Dupuy et al., 2004) concerne ces deux dernières règles. *ATCTRS* (cf. équation 6.3) et *ATCTRS F* (cf. équation 6.4) sont deux règles dérivées de celles proposées par A. Vepsalainen et T. Morton (1987) (*ATC*), ainsi que Y. Lee et M. Pinedo (1997) (*ATCS*). La règle *ATC* (qui est une évolution de la règle *COVERT*) est construite comme un subtil mélange entre une règle *WSPT* (pour les opérations en retard, le choix est fait selon le temps opératoire minimum) et une règle de priorité basée sur la marge minimum (lorsque l'opération est en avance).

L'idée est de reprendre une structure de règle qui a prouvé son efficacité pour les problèmes à machines parallèles et un objectif lié aux retards, en l'adaptant au problème que nous souhaitons résoudre. L'ensemble des contraintes exprimées dans notre problème pose la difficulté de coordination des différentes ressources nécessaires, ce qui peut créer des effets d'attente d'une ressource assez importants et donc des « trous de charge ». Afin de caractériser cette occupation, l'idée est de choisir le meilleur remplissage, que l'on peut caractériser par le TRS (Taux de Rendement Synthétique). Le TRS correspond à la fraction du temps à valeur ajoutée pour le client ramenée au temps consommé sur la ressource. Dans notre cas, le temps utile est le temps analytique hors temps de préparation et hors temps d'attente d'une ressource secondaire (colonne ou technicien) d'une opération.

$$ATC(o_{i,j}, m) = \frac{1}{p_{i,j}} e^{-Atc} \quad (6.1)$$

avec $Atc = \frac{Max(d_i - p_{i,j} - T_m, 0)}{\bar{p}}$ où \bar{p} est la durée moyenne des opérations

$$ATCS(o_{i,j}, m) = \frac{1}{p_{i,j}} e^{-\frac{Atc}{k_1}} e^{-\frac{s_{i,j}}{k_2 \bar{s}}} \quad (6.2)$$

où \bar{s} est la durée moyenne du set-up des opérations

$$ATCTRS(o_{i,j}, m) = \frac{1}{p_{i,j}} e^{-\frac{Atc}{k_1}} e^{\frac{TRS}{k_2}} \quad (6.3)$$

avec $TRS = \frac{p_{i,j}}{c_{i,j} - T_m}$

Le premier terme exponentiel d'*ATCTRS* est celui de la règle *ATC* et permet de prendre en compte l'importance de la date de fin au plus tard. Le second terme exponentiel correspond à un choix lié à la maximisation du *TRS*. La valeur *Atc* représente la marge positive disponible d'une opération. Si l'opération est en retard, le terme *Atc* est donc nul et $ATC(o_{i,j}, m) = \frac{1}{p_i}$.

Si nous considérons deux affectations *x* et *y* ayant la même durée opératoire, ces deux opérations donneront la même valeur de *ATCTRS* si et seulement si $e^{-\frac{Atc(y)}{k_1}} e^{\frac{TRS(y)}{k_2}} = e^{-\frac{Atc(x)}{k_1}} e^{\frac{TRS(x)}{k_2}}$, ce qui est équivalent à $Atc(y) = Atc(x) + \frac{k_1}{k_2}(TRS(y) - TRS(x))$.

Le rapport $\frac{k_1}{k_2}$ est homogène à un temps et correspond à l'horizon sur lequel on accepte d'anticiper une opération qui améliore l'occupation machine, alors qu'elle n'est pas en retard. Pour les opérations en retard ($Atc = 0$), la maximisation du *TRS* est privilégiée.

En suivant le même raisonnement, on peut remarquer, pour la règle *ATCS*, que le rapport $\frac{k_1}{k_2}$ correspond au coefficient multiplicateur appliqué au temps de set-up moyen pour estimer l'horizon sur lequel une opération diminuant le set-up peut être anticipée.

La règle *ATCTRSF* considère un troisième terme exponentiel lié à la flexibilité des opérations.

$$ATCTRSF(o_{i,j}, m) = \frac{1}{p_{i,j}} e^{-\frac{Atc}{k_1}} e^{\frac{TRS}{k_2}} e^{-\frac{F}{k_3}} \quad (6.4)$$

avec $F = \frac{card(ME_{i,j})}{card(ME)}$ où $card(ME)$ est le nombre moyen de machines éligibles par opération

En appliquant toujours le même raisonnement, le rapport $\frac{k_1}{k_3}$ est homogène à un temps et correspond à l'horizon de temps sur lequel on cherche à anticiper une opération ayant peu de flexibilité. Pour le rapport $\frac{k_2}{k_3}$, il s'agit de connaître le niveau de dégradation du TRS jusqu'auquel une opération ayant peu de flexibilité peut être retenue, puisque $TRS(y) = TRS(x) + \frac{k_2}{k_3}(F(y) - F(x))$. En effet, si nous repreneons les affectations *x* et *y*, $ATCTRSF(x) = ATCTRSF(y)$ si et seulement si $e^{-\frac{Atc(y)}{k_1}} e^{\frac{TRS(y)}{k_2}} e^{-\frac{F(y)}{k_3}} = e^{-\frac{Atc(x)}{k_1}} e^{\frac{TRS(x)}{k_2}} e^{-\frac{F(x)}{k_3}}$.

6.5 Expérimentation

Afin de pouvoir juger de la pertinence de ces diverses règles de priorité, nous proposons de les tester sur une série de jeux de données générés stochastiquement dans des plages de données réalistes. Les

bornes des plages de données correspondent aux bornes des données relevées sur le terrain. Générer des données dans des plages bornées permet de s'affranchir du terrain, dans le sens où nous ne souhaitons pas trouver une méthode performante pour une configuration donnée (des temps de set-up et opératoire connus précisément), mais plutôt dans un environnement donné car le mix-produit évolue au cours du temps.

6.5.1 Jeux de données

Nous allons étudier un atelier contenant 10 machines et 20 colonnes. L'atelier est ouvert de 8 heures à 18 heures du lundi au vendredi de chaque semaine. Toutes les machines sont disponibles à l'initialisation sur l'ensemble de la période considérée. Le nombre moyen de machines éligibles par opération sera successivement paramétré à 2, 4 et 6, avec à chaque fois un écart-type de 0,5. Nous observerons également le cas où toutes les machines sont éligibles pour l'ensemble des opérations. Pour éviter d'être trop contraint par la disponibilité des colonnes, les 10 % des colonnes les plus utilisées dans le plan de production défini seront au nombre de 3 (i.e. 3 occurrences de la même colonne pourront être utilisées simultanément), les 30 % suivants seront au nombre de 2, tandis que les 60 % les moins utilisés seront présents en un seul exemplaire.

Du point de vue des données techniques, deux cas de figures seront étudiés : 10 gammes ou 20 gammes différentes, contenant aléatoirement 1, 2 ou 3 opérations (tirage uniforme). La somme du temps opératoire et du temps de set-up est choisie pour chaque opération selon une loi uniforme entre 120 minutes et 1 440 minutes. Nous explorerons les cas où le temps de set-up représente 50 % de cette valeur et le cas où il représente 75 %. Chaque opération se verra également attribuer un type de colonne à utiliser.

Pour analyser l'impact de la charge de l'atelier, le plan de production sera soit de 70 jobs (charge moyenne), soit de 140 jobs (charge forte). Chaque job se verra attribuer une gamme (mais de façon à ce qu'au moins chaque gamme soit mise en œuvre une fois). Nous allons modéliser les dates de disponibilité et les dates de besoin des jobs à partir du fait que la date de besoin est la date de disponibilité augmentée d'une valeur C . Cette valeur C sera tirée selon une loi normale centrée sur 10 jours et d'écart-type 1 jour. La date de disponibilité se positionne en début de chaque journée ouvrée, la journée ouverte étant tirée aléatoirement dans l'intervalle d'entiers $[-8; 5]$.

Les différents domaines de valeurs choisis permettent de générer des situations d'ordonnancement réalistes, à la fois en termes d'échelle, de charge et de contrainte de délai.

6.5.2 Paramétrage des règles de tri

Afin de faire varier le poids relatif de chacune des composantes des règles *ATC*, *ATCTRS* et *ATCTRS F*, plusieurs valeurs pour les paramètres k seront testées.

6.6 Résultats

Nous allons maintenant étudier les résultats pour les cas ayant une charge normale et une charge forte, et la présence ou non de la contrainte de validation de fin de temps de préparation.

TAB. 6.1 – Valeurs des coefficients k pour les règles *ATCS* et *ATCTRS*.

k_1	k_2
1	1
1	2
2	1
10	1
100	1
1000	1

TAB. 6.2 – Valeurs des coefficients k pour la règle *ATCTRSF*.

k_1	k_2	k_3
1	1	1
1	2	1
2	1	1
1	1	2
1	1	10
10	1	10
1	10	10

Pour chacune des 16 configurations possibles d'atelier, 10 jeux de données sont générés. Ainsi, l'algorithme va être mis en œuvre sur 160 cas, afin de tester les 26 politiques de test retenues. Chaque plan obtenu sera évalué selon le critère de la somme des retards, afin de juger de la qualité de la solution obtenue.

Pour simplifier la présentation de ces résultats, nous définissons le taux de résolution en fonction d'un critère. Il s'agit de tracer la courbe du pourcentage des 160 cas testés pour lesquels le critère sera inférieur à la valeur portée en abscisse. Ainsi, pour présenter les résultats concernant les heuristiques, nous allons tracer le taux de résolution en fonction de la somme des retards cumulés. Ceci signifie donc que l'axe des abscisses représente la somme des retards cumulés et l'axe des ordonnées est un pourcentage des 160 problèmes résolus dans la limite d'un retard porté en abscisse.

6.6.1 Charge normale (70 jobs)

6.6.1.1 Sans contrainte de validation de fin de temps de préparation

Nous avons analysé les résultats afin de voir si une heuristique dominait les autres. Pour ce faire, nous proposons de comparer le taux de résolution en fonction de la somme des retards des jobs. Pour améliorer la compréhension des valeurs limites du critère, nous la présenterons sous la forme du retard moyen par job : par exemple, un retard cumulé de 4 200 minutes correspond à un retard moyen d'une heure par job pour la charge moyenne (70 jobs), 100 800 minutes représentant 24 heures de retard. Ces deux valeurs seront particulièrement suivies pour évaluer la performance des méthodes de résolution. Dans le cas d'une charge forte (140 jobs), nous nous intéresserons donc à environ 8 000 et 200 000

minutes de retard. Nous pouvons voir sur la figure 6.1 que, pour un retard d'une heure par job, le taux de résolution évolue entre 0 et près de 70 % selon la politique choisie, alors que si nous prenons un retard moyen d'un jour, ce même taux de résolution évolue entre 10 % et quasiment 100 %.

En faisant l'analyse plus détaillée de la figure 6.1, nous pouvons mettre en évidence un classement des politiques, en allant de la moins bonne à la meilleure (cf. tableau 6.6.1.1) :

- la politique faisant intervenir l'aléatoire (pml, random) est bien la plus mauvaise, comme attendu ;
- les trois politiques faisant intervenir les notions de flexibilité des machines (*LFM : least flexible machine*) et des opérations (*LFO : least flexible operation*) sont légèrement meilleures ;
- la seule prise en compte de la contrainte de délai après le choix de la première machine libre, que ce soit par l'intermédiaire de la politique *EDD* ou de la politique *ATC*, améliore sensiblement les résultats par rapport aux politiques précédentes, tout comme la politique (*TRS, EDD*) ;
- nous voyons que la prise en compte du temps de set-up via le critère *ATCS*, en plus du critère de délai, apporte un gain notable ;
- les deux meilleures politiques sont celles qui, en plus du délai, considèrent le bon chargement des machines via le critère *TRS*. La prise en compte ou non de la flexibilité des machines n'influe que peu sur le résultat obtenu. Enfin, nous remarquons que le paramétrage de ces heuristiques modifie légèrement leur comportement, nous observons même qu'un paramétrage devient meilleur qu'un autre au fur et à mesure que la valeur du retard augmente (*ATCTRSF(10, 1, 10)* dépasse *ATCTRSF(1, 1, 10)* aux environs de 10 000 minutes de retard).

Tab. 6.3 – Classement des heuristiques pour le cas d'une charge moyenne sans validation de fin de set-up.

ordre	heuristique	taux pour 1h/job	heuristique	taux pour 1j/job
1	pml, atctrsf1110	67 %	pml, atctrsf10110	100 %
2	pml, atctrs11	66 %	pml, atctrsf1110	100 %
3	pml, atctrs101	63 %	pml, atctrs101	100 %
4	pml, atctrsf10110	62 %	pml, atctrs11	99 %
5	pml, atcs11	50 %	pml, atcs101	97 %
6	pml, atcs101	39 %	pml, atcs11	97 %
7	pml, atc	24 %	edd, trs	86 %
8	pml, edd	24 %	trs, edd	77 %
9	edd, trs	19 %	pml, edd	68 %
10	trs, edd	5 %	pml, atc	65 %
11	lfo, lfm	2 %	lfo, lfm	41 %
12	pml, lfo	1 %	lfm, lfo	37 %
13	lfm, lfo	1 %	pml, lfo	31 %
14	pml, random	0 %	pml, random	7 %

6.6.1.2 Avec contrainte de validation de fin de temps de préparation

La figure 6.2 présente le taux de résolution des heuristiques en fonction de la somme des retards pour le cas à 70 jobs et avec la contrainte de validation du set-up par un technicien. Nous observons que les

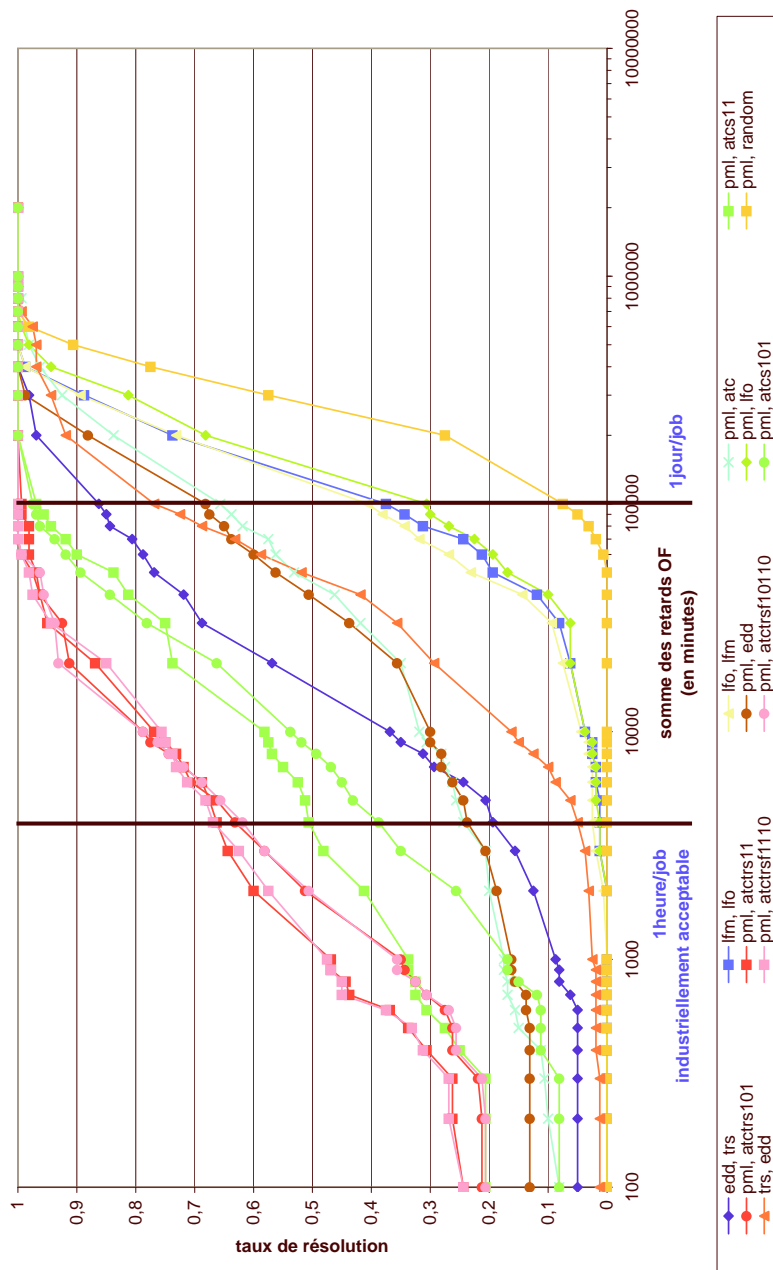


FIG. 6.1 – Comparaison des performances des heuristiques pour une charge moyenne sans validation de fin de set-up.

résultats sont légèrement moins bons qu'en l'absence de cette contrainte de validation de fin de set-up. Ceci n'est pas surprenant, étant donné que le problème devient plus difficile à résoudre. En effet, pour un retard moyen d'une heure (respectivement un jour) le taux de résolution est compris entre 0 et 20 % (respectivement entre 10 % et 90 %), alors que sans cette contrainte supplémentaire les meilleures heuristiques arrivaient à 70 % (respectivement 100 %). Enfin, nous remarquons que même si les règles liées à *ATCTRS* et *ATCTRS F* arrivent toujours parmi les meilleures, la règle *EDD, TRS* devient très intéressante. Nous n'avons pas d'explication à ce phénomène, nous pouvons simplement le constater.

6.6.2 Charge forte (140 jobs)

Nous allons maintenant analyser les résultats avec une charge plus forte, doublée par rapport à la précédente, soit donc 140 jobs.

6.6.2.1 Sans contrainte de validation de fin de temps de préparation

Concernant la figure 6.3 qui présente les résultats dans le cas où la validation de la fin de set-up n'est pas nécessaire, nous observons un effondrement du taux de résolution en fonction du retard. En effet, dans ce cas là, les heuristiques ne résolvent quasiment aucun problème avec un retard moyen d'une heure par job, et ne résolvent qu'un peu plus de la moitié des problèmes avec un jour de retard en moyenne, alors qu'avec une charge moitié moindre, quasiment tous les problèmes étaient résolus. En revanche, ce sont toujours les mêmes qui se classent parmi les meilleures : *ATCTRS* et *ATCTRS F*.

6.6.2.2 Avec contrainte de validation de fin de temps de préparation

Des résultats peu surprenants sont obtenus pour le cas à 140 jobs avec validation de fin de set-up (cf. figure 6.4). L'effondrement du taux de résolution lié à la charge plus importante est constaté, et nous retrouvons également une dégradation par rapport au problème précédent, liée à la présence d'une contrainte supplémentaire. Les trois meilleures heuristiques présentées pour le problème à 70 jobs (*ATCTRS*, *ATCTRS F* et *EDD, TRS*) sont rejointes par *TRS*, *EDD*. Là encore, nous constatons cet état de fait sans pouvoir l'expliquer.

6.6.3 Analyse des résultats

Les résultats présentés proviennent de la simulation de 64 cas d'atelier (set-up à 50 % ou 75 %, 10 ou 20 gammes, avec ou sans contrainte de validation de fin de set-up, 2, 4, 6 ou 10 machines éligibles en moyenne, et une charge de 70 ou 140 jobs), chacun simulé dix fois et pour lesquels nous avons testé 26 politiques différentes. Cela représente un total de 16 640 ordonnancements réalisés, que nous avons évalués avec dix critères (retard max, fin au plus tard, sommes des fins de jobs, somme des retards des opérations, somme des retards des jobs, retard moyen par job, nombre d'opérations en retard, nombre de jobs en retard, occupation machine en incluant le set-up, occupation machine en excluant le set-up). Finalement nous obtenons 16 640 individus ayant chacun 10 caractères, c'est notre population.

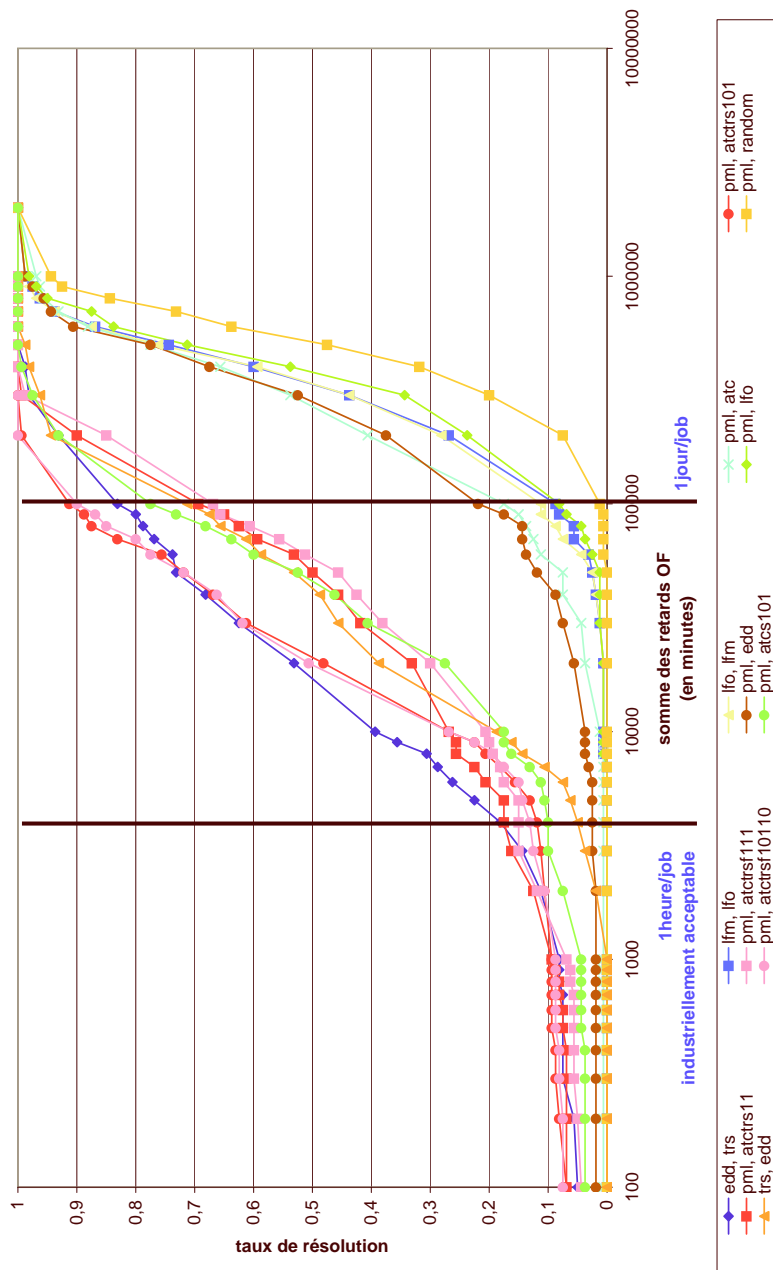


FIG. 6.2 – Comparaison des performances des heuristiques pour une charge moyenne avec validation de fin de set-up.

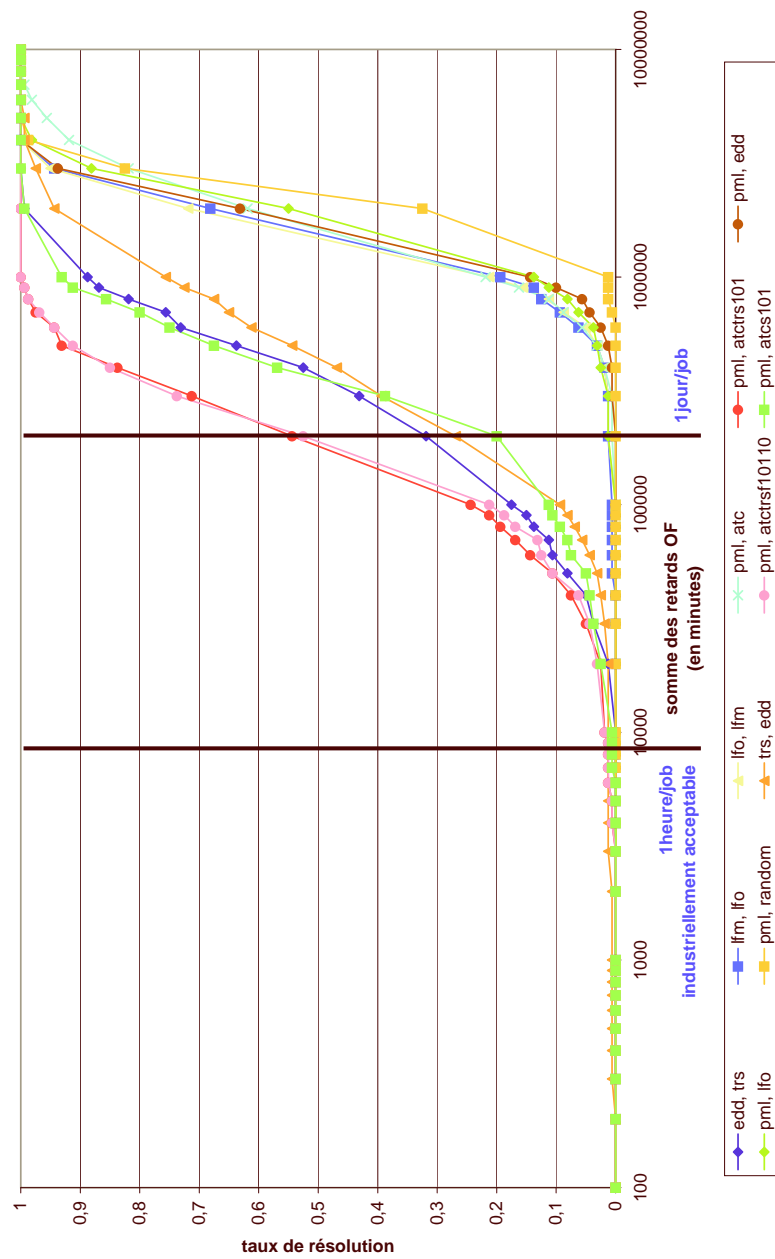


FIG. 6.3 – Comparaison des performances des heuristiques pour une charge forte sans validation de fin de set-up.

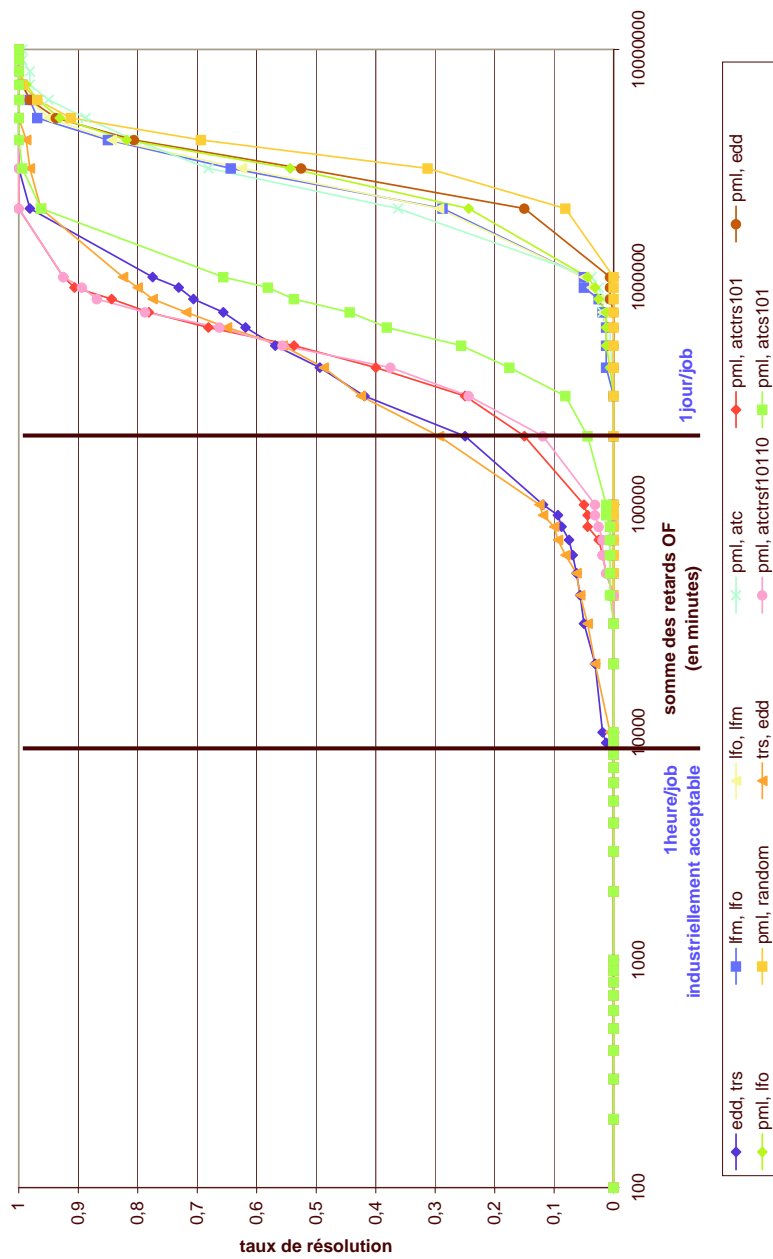


FIG. 6.4 – Comparaison des performances des heuristiques pour une charge forte avec validation de fin de set-up.

Nous utilisons les techniques de l'analyse de données (J.-M. Bouroche et G. Saporta, 2002) afin de pouvoir analyser cette importante quantité de données. Les méthodes d'analyse de données permettent d'étudier globalement des individus et des variables les caractérisant en utilisant généralement des représentations graphiques. Avant d'utiliser ces méthodes pour notre problème, un rapide panorama sera effectué. Le logiciel utilisé par la suite pour ces analyses est Le Sphinx.

Au sein des statistiques, le domaine de la statistique exploratoire vise à synthétiser et résumer l'information contenue dans les données. Pour ce faire plusieurs types de méthodes existent :

méthodes de classification qui forment des groupes d'individus ;

méthodes factorielles qui réduisent le nombre de caractéristiques.

Notre objectif étant de déterminer les caractéristiques importantes au sein de notre population, nous nous focalisons sur les méthodes factorielles qui comportent trois méthodes :

analyse en composantes principales ou ACP pour les caractères quantitatifs ;

analyse des correspondances pour les caractères qualitatifs ;

analyse canonique pour le lien entre les caractères.

L'ACP a pour objet la description de données contenues dans un tableau individus-caractères numériques par une représentation approchée du nuage des individus dans un sous espace de caractères de dimension plus faible. L'objectif est de permettre, par des interprétations graphiques, de déterminer des groupes d'individus qui se distinguent des autres et des caractères discriminants. Il s'agit de la méthode de base de l'analyse de données. C'est une méthode factorielle, car la réduction du nombre des caractères ne se fait pas par une sélection de certains d'entre eux, mais par la construction de nouveaux caractères synthétiques obtenus en combinant les caractères initiaux. Les nouveaux caractères sont des combinaisons linéaires des anciens.

L'analyse factorielle des correspondances, ou AFC, cherche à réduire l'espace de représentation d'un tableau de contingence (tri croisé d'un tableau de données, i.e. la ventilation des individus selon deux caractères qualitatifs), tout en essayant de ne pas perdre trop d'informations au moment de cette réduction. L'analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM) est une simple extension de l'AFC. Alors que l'AFC met en correspondance deux caractères (analyse bivariée), l'AFCM traite n caractères qualitatifs simultanément (analyse multivariée).

6.6.3.1 Critères

Nous réalisons une ACP afin de comprendre le lien entre les différents critères mesurés.

L'objectif recherché par cette analyse de données est de déterminer des groupes de critère qui distinguent des ordonnancements de la même manière. La figure 6.5 représente le plan factoriel obtenu par une ACP faite sur la population des 16 640 ordonnancements évalués avec les 10 critères précédents. Elle fait apparaître le cercle des corrélations entre les différents critères ainsi que la projection des individus sur deux axes construits par l'ACP. La projection d'un critère sur un axe renseigne sur le sens et le poids de la contribution de ce critère à la définition de l'axe.

Le premier résultat notable, comme le montre la figure 6.5, est que 90 % de l'information est expliquée sur deux dimensions :

- Un axe fort qui porte 72 % de l'information. Il représente les caractères liés à l'aspect temporel (retard ou délai). Tous ces caractères ont à peu près le même poids et vont tous dans le même sens. Par conséquent, un individu (un ordonnancement) qui est bon (respectivement mauvais) sur un des critères l'est aussi sur les autres.
- Un second axe qui porte 18 % de l'information. Il représente les caractères liés à l'occupation des machines.

La quasi-orthogonalité entre eux des deux groupes de caractères montre la quasi-indépendance entre l'aspect temporel et l'occupation des machines. Nous remarquons que l'ensemble des critères liés au retard sont très proches les uns des autres. En outre, ils sont de poids équivalents puisqu'ils sont tous voisins du cercle des corrélations (cercle sur la figure 6.5). Ceci nous indique qu'ils ont des coefficients de corrélations équivalents et donc nous permet d'en choisir un et de considérer les autres comme équivalents. Nous validons donc la restriction de notre problème au seul critère de la somme des retards des jobs.

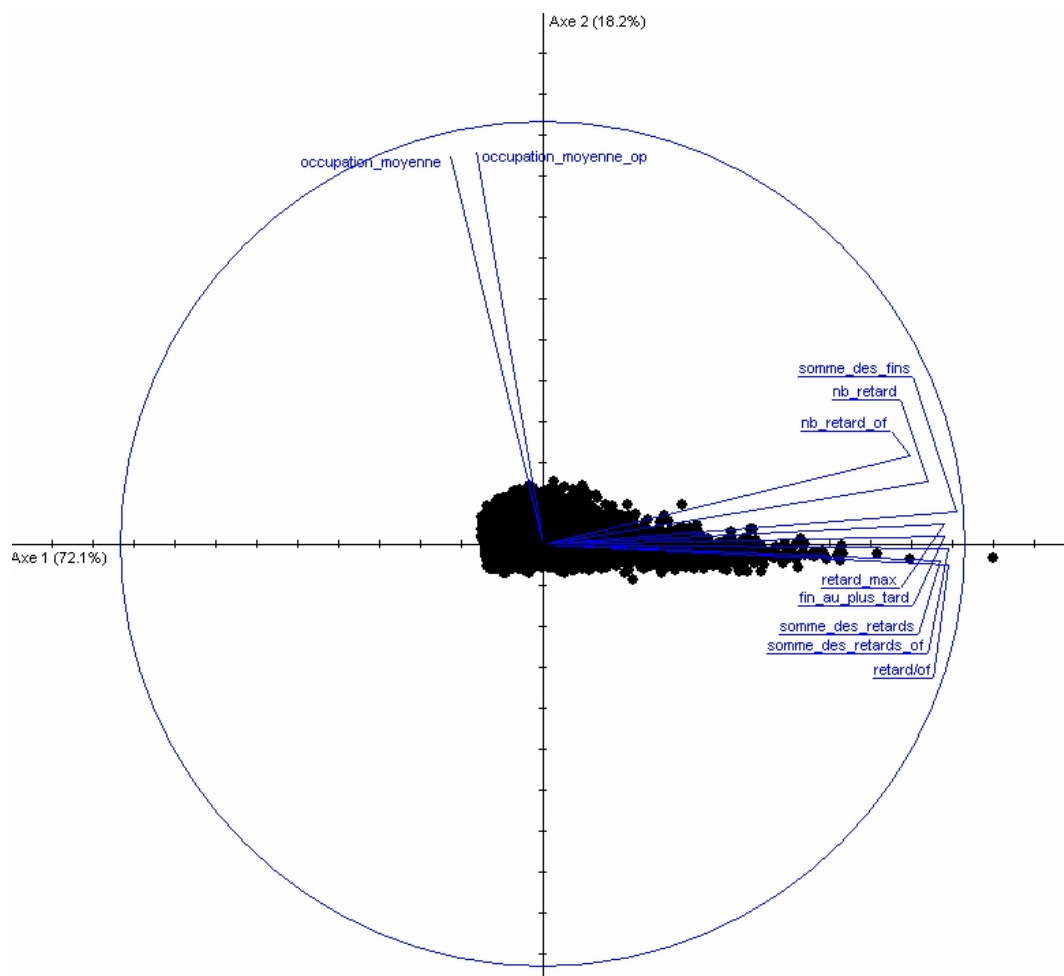


FIG. 6.5 – Analyse en composantes principales des critères d'évaluation.

6.6.3.2 Choix de la politique

Nous recourons également à l'analyse de données pour déterminer les règles d'ordonnancement performantes pour la minimisation de la somme des retards des jobs. Chaque ordonnancement est ici caractérisé par un critère qualitatif non numérique : la règle utilisée. Pour pouvoir réaliser une Analyse Factorielle en Composantes Multiples (AFCM), nous avons dû rendre le retard qualitatif. Pour ce faire, nous avons considéré une échelle de A à E fonction de la valeur du retard moyen par job. A correspond à un retard inférieur à 1 heure par job, B à 6 heures, C à 12 heures, D à 24 heures, E à 48 heures et F au-delà. Le résultat est donné par la figure 6.6, qui montre les politiques tendant vers chacune des classes de retard. Avant tout, il est important de remarquer que le test du χ^2 montre que la dépendance entre le retard et les politiques est très significative. L'analyse est menée en étudiant la proximité deux-à-deux entre les règles d'ordonnancement (carrés bleus avec le nom de la règle d'ordonnancement) et les indicateurs de retards (carrés rouge, notés de A à F).

Un premier axe, qui porte près de 70 % de l'information, distingue la classe F des autres. Nous obtenons donc trois grandes classes de population :

- des règles centrées sur A ou B ou C ou D ou E (par exemple : *PML, ATCTRS(10, 1)* ou *EDD, TRS*);
- des règles centrées sur F (par exemple : *PML, ATC*);
- des règles à mi-chemin, ce qui traduit qu'elles sont proches à la fois de A, B, C, D, E et de F.

Un deuxième axe, qui porte environ 25 % de l'information, distingue les règles selon qu'elles sont proches de A, B, C, D ou E :

A seul aucune règle ;

B seul trois règles (*PML, ATCTRS(10, 1)*, *PML, ATCTRS F(10, 1, 10)*, *PML, ATCTRS F(10, 1, 1)*) ;

entre B et C *EDD, TRS*, ce qui nous permet de retrouver le résultat selon lequel cette règle est parfois performante (proche de B dans les cas avec validation de fin de set-up), parfois moins (proche de C, D ou E dans les cas sans validation de fin de set-up) ;

C, D, E classes proches qui distinguent peu les règles.

Nous concluons que les règles qui doivent être considérées comme performantes, mais aussi robustes par rapport aux problèmes, sont *ATCTRS(10, 1)*, *ATCTRS F(10, 1, 1)* et *ATCTRS F(10, 1, 10)*. En outre, il apparaît clairement que c'est le facteur *ATCTRS(10, 1)* - commun à ces trois heuristiques - qui apporte cette performance. Nous retenons également *ATCTRS(1, 1)* et *ATCTRS F(1, 1, x)* avec x valant 1, 2 ou 10, qui sont parfois très bonnes (proches de A), parfois assez bonnes (proches de B), mais aussi parfois très mauvaises (attraction vers F). Malgré le manque de robustesse aux problèmes, nous les retenons pour leur grande performance dans certains cas. Il apparaît également ici que c'est le facteur *ATCTRS(1, 1)* commun aux quatre règles qui apporte cette performance. Au bilan, nous retenons la politique *ATCTRS* pour laquelle les deux instances (1,1) et (10,1) sont testées afin de garder le meilleur résultat des deux.

6.6.3.3 Impact des paramètres de l'atelier

Nous avons également cherché à connaître l'impact des différents paramètres de génération de nos ateliers (rapport du temps de set-up sur temps total, nombre de gammes, présence ou non de validation

qualité retard	1.rapport_sp	2.nb_mono	3.valid fin setup	4.nb_moy_m	7.of
A (1917)	3 (58%)	20 (54%)	non (82%)	10 (27%) 4 (26%) 6 (25%)	70 (99%)
B (1878)	3 (54%)	20 (52%)	non (58%)	10 (29%)	70 (93%)
C (1091)	3 (52%)	10 (53%)	non (56%)	2 (29%) 4 (27%)	70 (84%)
D (1522)	1 (50%)	10 (52%)	non (50%)	2 (31%)	70 (70%)
E (2313)	1 (50%)	20 (51%)	oui (53%)	2 (28%) 4 (26%)	70 (53%)
F (7919)	1 (53%)	10 (51%)	oui (60%)	6 (26%) 10 (25%)	140 (82%)
ENSEMBLE (16640)	1 (8320) 3 (8320)	10 (8320) 20 (8320)	non (8320) oui (8320)	2 (4160) 4 (4160) 6 (4160) 10 (4160)	70 (8320) 140 (8320)

FIG. 6.7 – Analyse de l’impact des paramètres de l’atelier au moyen d’un tableau des caractéristiques.

que les ressources secondaires (*ATCTRS*), puis (2) en considérant en plus la flexibilité des opérations (*ATCTRSF*). Nous constatons finalement que la règle *ATCTRS* donne de meilleurs résultats qu'*ATCTRSF* et que l'augmentation de la flexibilité des machines a peu d'impact sur le critère.

Enfin, les résultats obtenus montrent que pour un respect quasi-parfait des dates de besoin (retard autorisé d'une minute par job en moyenne), seuls 25 % des problèmes ont été résolus pour le cas le plus simple (charge moyenne et pas de validation de fin de set-up) et ce taux de résolution est proche de 0 % pour le cas le plus difficile (charge forte et validation de fin de set-up). De même, si nous autorisons un retard moyen d'une heure par job (contrainte industriellement acceptable), nous voyons que seul le cas de figure le plus simple (charge moyenne, pas de validation de fin de set-up) a un taux de résolution acceptable (proche de 75 %), les autres étant inacceptables (entre 0 et 20 %). Nous proposons par la suite d'expérimenter une approche par méta-heuristiques, afin d'améliorer ces résultats.

Chapitre 7

Résolution par méta-heuristique : recuit simulé

7.1 États de l'art

7.1.1 Méta-heuristiques

Une heuristique est une méthode adaptée à la résolution d'un problème donné. Le préfixe « méta » indiquant la généralité, une méta-heuristique est une méthode adaptée à la résolution d'une classe de problème donnée. Les méta-heuristiques sont donc une classe de méthodes capables de résoudre un large ensemble de problèmes d'optimisation combinatoire. Parmi elles, chacune est plus ou moins adaptée pour un problème donné. Habituellement, on retient quatre types de méta-heuristiques principales : le recuit simulé, la recherche tabou, les algorithmes génétiques et les colonies de fourmis. Elles sont pour la plupart inspirées de phénomènes physiques ou biologiques : orientation des fourmis, positionnement des atomes dans une structure moléculaire, ou encore évolution d'une population par croisements et mutations génétiques. Dans ces phénomènes, la nature a mis en place des stratégies générales pour résoudre un problème donné relativement générique. Ainsi, l'algorithme de colonies de fourmis provient-il de l'orientation des fourmis dans un environnement quelconque et non de l'orientation des fourmis dans un terrain avec des cailloux disposés de façon connue, ce qui permettrait alors de créer une heuristique, un algorithme pour résoudre ce problème donné.

Les méta-heuristiques ont en pratique des résultats intéressants depuis plusieurs décennies et des études comparatives ont été réalisées (G. Fleury et M. Gourgand, 1998). Cependant, pour un problème donné, la problématique du choix de la méta-heuristique n'est pas triviale. J. Dreot et al. (2003) précise qu'il n'existe aucun résultat théorique qui permette de comparer les méta-heuristiques entre elles. Le choix d'une méta-heuristique est fait - en pratique - par rapport à sa facilité à traduire les solutions et les voisinages du réel vers la modélisation propre à la méta-heuristique. Par exemple, le problème du voyageur de commerce sera plus facilement traduit par un algorithme de colonies de fourmis que par des algorithmes génétiques, car le premier est issu du phénomène physique de l'orientation des fourmis, qui est plus proche du problème de voyageur de commerce, que ne le sont les mutations et les croisements de chromosomes.

7.1.2 Recuit simulé

Nous avons retenu une heuristique de recherche locale en raison de la facilité à exprimer un voisinage. Parmi celles disponibles dans cette catégorie, nous avons choisi le recuit simulé en raison de nombreux résultats sur des problèmes proches qui nous permettaient de bénéficier de nombreuses années d'expérience sur le réglage des paramètres. L'algorithme du recuit simulé qui a été utilisé est présenté par l'algorithme 3.

« Le recuit simulé a été proposé en 1982 par des spécialistes de physique statistique qui s'intéressaient aux configurations de basse énergie de matériaux magnétiques désordonnés regroupés sous le terme de verre de spin. » C'est ainsi que P. Siary (1994) nous rappelle les origines de cette méthode d'optimisation combinatoire. C'est pour éviter les structures liées à des minima énergétiques locaux qu'ils se sont inspirés de la technique de recuit des métallurgistes, qui permet d'obtenir un solide dans un état d'énergie minimale (donc intéressant pour ses propriétés mécaniques), en le chauffant jusqu'à l'état liquide, puis en abaissant lentement sa température (souvent suivant la loi de décroissance par palier proposée par N. Metropolis et al. (1953)). Le recuit métallurgique permet d'amener le matériau dans un état stable d'énergie minimale, alors que ces mêmes métallurgistes utilisent la technique de trempe pour figer une structure métallographique intéressante en amenant le matériau dans un minimum local d'énergie. Cette technique de trempe est également utilisée en optimisation, afin d'améliorer une solution jusqu'au minimum local du bassin d'attraction dans lequel elle se situe.

Les études théoriques de l'algorithme de recuit simulé, notamment à l'aide de chaînes de Markov, permettent d'établir que la vitesse de convergence de l'algorithme est améliorée en partant d'une température élevée et en la faisant décroître par palier. Selon P. Siary (1994), le recuit simulé permet d'obtenir une solution de bonne qualité (proche à quelques pourcents de l'optimum global) en un temps polynomial. Sous certains critères - inatteignables en pratique - la convergence du recuit simulé vers l'optimum global a été démontrée (P. Laarhoven et al., 1992).

Les premières applications du recuit simulé ont eu trait à la conception de circuits électroniques (problème de placement-routage pour Thomson), au traitement d'images (reconstitution d'images à partir de données incomplètes, applications en robotique, médecine, géologie...), à la collecte d'ordures ménagères (problème du voyageur de commerce pour les ordures ménagères de Grenoble), à l'organisation du réseau informatique du Loto (connexion de dizaines de milliers de machines de jeu aux ordinateurs centraux), à la construction d'emplois du temps (jours de repos des plannings hospitaliers), à l'architecture (répartition des activités d'une entreprise dans les pièces d'un immeuble) et bien évidemment à l'ordonnancement.

Selon C. Koulamas et al. (1994), le recuit simulé permet de résoudre quatre classes de problèmes : les problèmes de routage (routing problems), les problèmes d'affectation (layout problems), les problèmes de planification (planning problems) et les problèmes d'ordonnancement (scheduling problems). C. Koulamas et al. (1994) montrent que plusieurs types d'ateliers pour plusieurs critères peuvent être résolus par le recuit simulé. Le problème à machines parallèles minimisant la somme des retards ($P_m || \sum T_i$) est étudié par C. Koulamas (1997). Il propose un recuit simulé qu'il compare à une heuristique de décomposition. Ce problème correspond à un sous-problème de celui que nous étudions et nous pouvons remarquer l'efficacité de cette méthode.

Alg. 2 TREMPE SIMULÉE (PROBABILITÉ D'ACCEPTATION INITIALE : PROB_INI, NOMBRE D'ITÉRATIONS DE LA TREMPE : ITER_TREMPE, SOLUTION INITIALE : SOL_INI, GÉNÉRATION DE VOISINAGE : VOISINAGE(), CALCUL DU CRITÈRE D'UNE SOLUTION : CRITÈRE())

– ∴ – *Plusieurs solutions existent : une solution courante, une solution voisine obtenue à partir de la solution courante en appliquant la fonction Voisinage() et une meilleure solution qui stocke la meilleure solution trouvée par l'algorithme*

– ∴ – *Cette procédure nécessite de partir d'une première solution, qui peut être générée par la procédure Heuristique par règle de priorité*

Sol_courante ← Sol_ini – ∴ – *La solution initiale est la solution de départ de l'algorithme*

Sol_meilleure ← Sol_ini – ∴ – *La solution initiale est la meilleure solution au départ*

Tant Que (Le nombre d'itérations de trempe n'est pas atteint) **Faire**

Iter ← Iter + 1 – ∴ – *Incréméntation du nombre d'itérations*

Sol_voisin ← Voisinage(Sol_courante) – ∴ – *Génération d'un voisinage de la solution courante*

Ecart ← Ecart + |Critère(Sol_voisin) - Critère(Sol_courante)| – ∴ – *Valorisation de la somme des écarts du critère entre les solutions et leur voisin*

Si (Critère(Sol_voisin) > Critère(Sol_courante)) **Alors**

– ∴ – *Test d'acceptation du voisin, la trempe n'accepte que les voisins qui améliorent la solution courante* Sol_courante ← Sol_voisin

Fin Si

Fin Tant Que

$T \leftarrow \frac{Ecart}{\log(Prob_ini)}$ – ∴ – *Calcul de la température d'initialisation du recuit en fonction de l'écart moyen rencontré lors de la trempe de façon à obtenir un taux d'acceptation valant Prob_ini au démarrage du recuit*

Retourner (Sol_meilleure, Critère_meilleur, T)

7.1.3 Structure de voisinage

G. Fleury (1994) indique que le choix crucial pour un recuit simulé se situe dans le système de voisinage : « c'est de lui que dépend le paysage de la fonction de coût ». Pour permettre la convergence, les propriétés de réversibilité (x voisin de y si et seulement si y voisin de x) et d'accessibilité (tout état conduit à tout autre par une suite finie d'états deux à deux voisins) doivent être vérifiés. En outre, des bonnes pratiques peuvent être énoncées pour la définition de voisinages. Tout d'abord, la taille d'un voisinage doit être liée à la taille du problème. Ensuite, deux voisinages doivent être d'énergie voisine (corrélation voisinage-coût). Enfin, plus la taille d'un voisinage est grande, moins il y a de minima locaux et mieux l'algorithme convergera. Bien évidemment, les deux dernières assertions sont contradictoires et le choix de la structure de voisinage devra résulter d'un compromis entre les deux.

Un problème proche de celui que nous étudions a été abordé par Y. Lee et M. Pinedo (1997). Après l'utilisation d'une heuristique pour trouver une première bonne solution, ils proposent un recuit simulé pour trouver une meilleure solution. Ils utilisent une structure de voisinage avec des règles définies pour rechercher de nouveaux voisinages. La structure de voisinage est une inversion de deux jobs adjacents dans la séquence. La séquence étant définie comme l'ensemble des jobs - quelle que soit la machine sur laquelle ils sont affectés - triés par ordre d'exécution. Pour construire un voisin, ils choisissent le temps de préparation le plus important parmi ceux qui n'ont pas encore été pris en compte. D.-W. Kim et al. (2002) proposent six règles pour construire des voisins : échanger/insérer des jobs/des ensembles de jobs, fusionner/diviser des ensembles de jobs. Ils introduisent également une probabilité de choisir un job ou un ensemble de jobs définie relativement au retard de ce job ou de cet ensemble de jobs. Des idées proches sont développées par P. Tian et al. (1999) qui introduisent

Alg. 3 RECUIT SIMULÉ (LOI DE TEMPÉRATURE : $T_{n+1} = \alpha T_n$, NOMBRE D'ITERATIONS MAXIMUM : ITERMAX, NOMBRE MAXIMUM DE PALIERS INVARIANTS : PAL_INV_MAX, NOMBRE D'ITERATIONS MAXIMUM PAR PALIER : ITER_PAL, NOMBRE D'ACCEPTATION MAXIMUM PAR PALIER : ACCEPT_PAL, SOLUTION INITIALE : SOL_INI, GÉNÉRATION DE VOISINAGE : VOISINAGE(), CALCUL DU CRITÈRE D'UNE SOLUTION : CRITÈRE(), CALCUL DE LA PROBABILITÉ D'ACCEPTATION : BOLTZMANN(), TEMPÉRATURE INITIALE : T_{ini})

– . : – Plusieurs solutions existent : une solution courante, une solution voisine obtenue à partir de la solution courante en appliquant la fonction Voisinage() et une meilleure solution qui stocke la meilleure solution trouvée par l'algorithme

– . : – Cette procédure nécessite de partir d'une première solution, qui peut être générée par l'algorithme 2

Sol_courante ← Sol_ini – . : – La solution initiale est la solution de départ de l'algorithme

Sol_meilleure ← Sol_ini – . : – La solution initiale est la meilleure solution au départ

T ← T_{ini}

– . : – Phase de recuit

Tant Que ($Iter < Itermax$ et $Nb_pal_inv < Pal_inv_max$) **Faire**

 Iter ← Iter + 1 – . : – Incrémentation du nombre d'itérations

 Sol_voisin ← Voisinage(Sol_courante) – . : – Génération d'un voisinage de la solution courante

Si ($Cr\grave{e}tre(Sol_voisin) > Cr\grave{e}tre(Sol_courante)$) **Alors**

 – . : – Test d'acceptation du voisin, le recuit accepte les voisins qui améliorent la solution courante ainsi que les voisins qui la dégradent, mais avec une certaine probabilité d'acceptation dépendant de la température

 Sol_courante ← Sol_voisin

Si ($Cr\grave{e}tre(Sol_voisin) > Cr\grave{e}tre(Sol_meilleure)$) **Alors**

 – . : – Test pour savoir si cette solution est la meilleure trouvée par l'algorithme, si c'est le cas on la garde en mémoire

 Sol_meilleure ← Sol_courante

Fin Si

Si non

 Seuil_acceptation ← Boltzmann($Cr\grave{e}tre(Sol_voisin)$, $Cr\grave{e}tre(Sol_courante)$, T) – . : – Calcul du seuil d'acceptation pour un voisin qui dégraderait le critère

 Tirage aléatoire entre 0 et 1 – . : – On tire une valeur pour savoir si le voisin qui dégrade est accepté quand même

Si (Tirage < Seuil_acceptation) **Alors**

 Sol_courante ← Sol_voisin – . : – Acceptation d'un voisin qui dégrade la solution courante

Fin Si

Fin Si

Si (Nombre d'itérations à ce palier de température > Iter_pal ou Nombre d'acceptation à ce palier de température > Accep_pal) **Alors**

 – . : – Le changement de palier de température a lieu après Accep_pal voisinages acceptés ou après Iter_pal voisins générés

 T ← αT – . : – Au changement de palier, on applique la loi de décroissance de la température

Fin Si

Fin Tant Que

Retourner (Sol_meilleure et Cr\grave{e}tre_meilleur)

l'idée de générer un nouveau voisin en prenant une sous-séquence de jobs et en l'inversant, le dernier devenant le premier et ainsi de suite. Ils proposent deux variantes : une sans déplacement de cette sous-séquence au sein de la séquence totale ; une avec déplacement. Ce mécanisme apparaît intéressant dans le cas d'un problème de type flow-shop. C. Low (2004) utilise ces mêmes méthodes de génération de voisins pour un problème de type flow-shop hybride avec machines parallèles non-reliées. Cet article développe aussi l'échange de jobs selon des règles aléatoires, ainsi que l'échange entre jobs affectés à des machines différentes. Enfin, nous pouvons remarquer que J.-F. Chen et T.-H. Wu (2004) reprennent ces concepts en rajoutant l'idée du retard total d'une machine pour pondérer le choix du job à déplacer.

7.2 Notre proposition de voisinages

7.2.1 Caractérisation d'une solution

Dans notre algorithme, une solution est une séquence ordonnée de groupes d'opérations sur chaque machine. Un paquet d'opérations (cf. figure 7.1) est un ensemble d'opérations de la même famille, séquencées de façon continue sur une même machine, sans temps de préparation ou temps d'attente d'un opérateur. Un groupe d'opérations (cf. figure 7.1) est un ensemble d'opérations de la même famille, séquencées de façon continue sur une même machine, sans temps de préparation, mais où le temps d'attente d'un opérateur entre deux opérations est explicitement permis. Dans ce dernier cas, la colonne est conditionnée et on préfère attendre que les analyses arrivent. Un groupe pourra ainsi contenir plusieurs paquets.

L'ordonnancement est construit à partir de cette séquence, en affectant les opérations des groupes via la règle *ATCTRS*, en tenant compte des différentes contraintes. L'ordre des opérations dans les paquets et dans les groupes n'est donc pas géré par l'algorithme de recuit simulé. Nous obtenons ainsi les dates de début et de fin de chaque opération, permettant également de valoriser l'ordonnancement selon le critère choisi.



FIG. 7.1 – Représentation d'un paquet d'opérations.

7.2.2 Mécanismes de génération de voisins

Nous proposons maintenant plusieurs mécanismes pour générer des voisins de solution. Ces mécanismes sont tous basés sur le choix d'une première entité à déplacer, puis d'une deuxième entité qui va être la cible du déplacement. Ce déplacement peut être un échange entre les deux entités (cf. figure 7.3) ou une insertion de la première entité devant la deuxième (cf. figure 7.4).

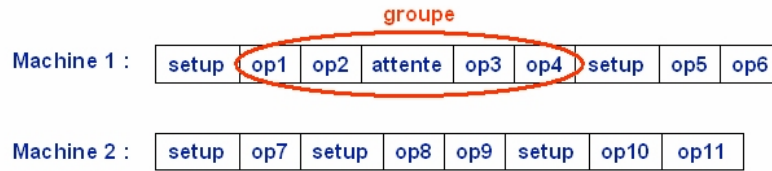


FIG. 7.2 – Représentation d'un groupe d'opérations.

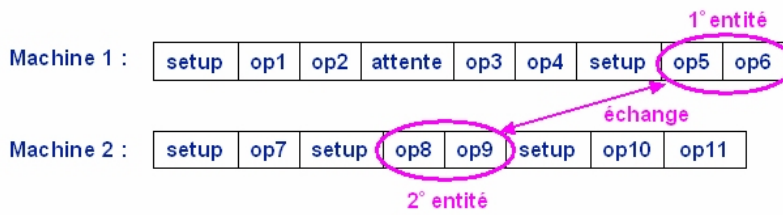


FIG. 7.3 – Représentation d'un mécanisme d'échange.

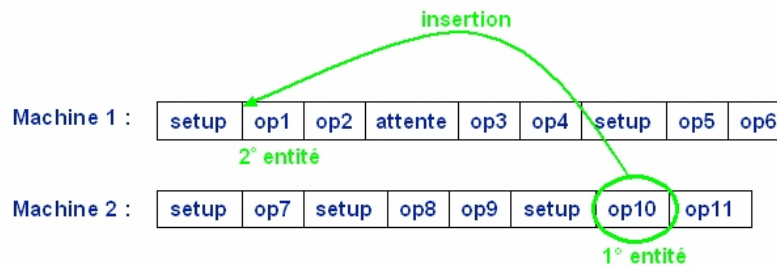


FIG. 7.4 – Représentation d'un mécanisme d'insertion.

Nous avons identifié plusieurs paramètres qui permettent de définir des voisinages adaptés au problème. Les différents mécanismes proposés correspondent aux différentes combinaisons de valeurs des paramètres.

Les paramètres utilisés sont de deux types :

- trois paramètres structurels qui définissent le voisinage en lui-même ;
- trois paramètres de génération qui précisent les règles à appliquer pour obtenir un voisin.

7.2.2.1 Paramètres structurels

Par une revue bibliographique, nous pouvons identifier deux types de mouvements principaux utilisés pour définir un voisinage : l'insertion et l'échange. L'échange essaie de maintenir la charge des différentes machines, alors que l'insertion est utilisée pour la modifier.

Le deuxième paramètre structurel correspond à la nature des entités déplacées. Dans plusieurs articles, il s'agit d'une opération seule alors que dans d'autres, ce sont des ensembles d'opérations contiguës. Dans notre cas, nous pouvons appliquer des mouvements à trois types d'entités :

- une opération seule ;
- un paquet d'opérations ;
- un groupe d'opérations.

Si nous considérons une première entité sélectionnée, elle peut être soit insérée avant une seconde entité, soit échangée avec cette seconde entité. Le troisième paramètre structurel va concerner le type de contrainte appliqué sur la famille de la deuxième entité choisie. Trois cas de figure sont possibles : **obligatoire** : la deuxième entité doit être de la même famille que la première, sinon le voisinage n'aboutit pas ;

pas nécessairement : aucune contrainte n'est appliquée ;

si possible : la deuxième entité est préférentiellement choisie de la même famille que la première.

Dans tous les cas, la seconde entité est choisie de telle sorte que la date de début de la première entité puisse être avancée.

7.2.2.2 Paramètres de génération

Les paramètres de génération précisent les règles de fonctionnement du mécanisme de voisinage.

Selon la littérature, il est pertinent que le choix de la première entité dépende de son retard. Ainsi, un groupe est sélectionné avec une probabilité pondérée par son retard (retard du groupe par rapport au retard total de la solution). Si une opération ou un paquet d'opérations doit être sélectionné, il est choisi au sein du groupe sélectionné, avec une probabilité qui dépend de son propre retard, ou bien, de manière équiprobable. Cela correspondra au premier paramètre de génération.

Pour le choix de la deuxième entité, nous devons sélectionner la (ou les) machines où la rechercher, puis procéder au choix de cette entité.

Le choix des machines parmi lesquelles la seconde entité sera recherchée est important. Plusieurs règles vont être proposées, correspondant au deuxième paramètre de génération :

idem : la seconde entité sera choisie sur la même machine que la première ;

machines éligibles : la seconde entité sera choisie parmi les entités présentes sur toutes les machines éligibles pour la première entité ;

uniforme : la seconde entité sera choisie parmi les entités présentes sur une des machines éligibles pour la première entité. Cette machine sera choisie de façon équiprobable.

Sur une machine donnée, la seconde entité sera cherchée entre la date de disponibilité de la première entité et la date de début de la première entité, ceci dans le but de pouvoir avancer la première entité dans le temps, étant donné qu'elle a été choisie en retard. Entre ces deux dates, plusieurs possibilités existent pour choisir la deuxième entité. Ainsi, nous définissons le troisième paramètre de génération de génération avec une alternative :

uniforme : le choix parmi les différentes entités est équiprobable ;

tard : parmi les entités possibles, on choisit celle qui commence au plus tard.

7.2.3 Structures complexes de voisinages

Après avoir passé en revue tous les paramètres unitaires, nous allons - en les combinant - pouvoir définir les structures complexes de voisinages (M. Dupuy et al., 2005). À la question de la nécessité de ces structures complexes, nous répondrons en définissant quatre structures manipulant des entités de plus en plus complexes, afin d'en étudier la pertinence :

simple : le seul mécanisme de voisinage est l'insertion d'une opération sélectionnée de façon uniforme sur sa machine et sa date (voir figure 7.5, mécanisme 0, voisinage SIMPLE).

opération : l'entité est toujours une opération. Cinq mécanismes sont proposés (voir figure 7.5, mécanismes 1 à 5, voisinage OP). Ce sont des combinaisons des paramètres de type de mouvements, choix de la machine et contrainte sur les familles.

opération-paquet : les entités déplacées peuvent être soit des opérations, soit des paquets d'opérations. Les cinq mêmes combinaisons de mouvements, choix de la machine et contrainte sur les familles sont retenues (voir figure 7.5, mécanismes 6 à 11, voisinage OP+PA). Un mécanisme (11) permet l'échange de paquets adjacents sur une même machine ;

opération-paquet-groupe : les trois entités peuvent être déplacées. Les 11 premiers mécanismes de voisinage sur les opérations et les paquets sont conservés. Six mécanismes sont ajoutés. Ils dérivent des six appliqués aux paquets, mais transposés ici aux groupes (voir figure 7.5, mécanismes 12 à 17, voisin OP+PA+GR).

La structure simple ne dispose que d'un seul mécanisme de voisinage, alors que les structures opération, opération-paquet et opération-paquet-groupe disposent respectivement de cinq, onze et dix-sept mécanismes. Nous utilisons les voisinages basés sur les mouvements d'opérations, qui sont de « petits » voisinages (au sens où ils induisent peu de perturbations lors d'un mouvement), pour affiner notre recherche. Les voisinages basés sur les groupes et les paquets effectuent des mouvements importants permettant d'accélérer la convergence (il faudrait beaucoup de voisinages d'opérations pour aboutir au même résultat qu'un seul voisinage de groupe). Dans les différentes structures complexes, nous avons choisi de ne pas les rendre trop compliquées en n'utilisant pas de probabilités trop complexes. Ainsi, tous les mécanismes ayant trait aux opérations ont la même probabilité. Les mécanismes propres aux paquets ont une probabilité d'occurrence moitié moindre que ceux des opérations, et les groupes moitié moindre que les paquets.

Nous allons maintenant regarder en détail les six mécanismes choisis :

SIMPLE	OP	OP+PA	OP+PA+GR	mécanismes	entité	mouvement	contrainte de famille	machine de la 2 ^e entité	choix de la 2 ^e entité
100%	-	-	-	0	op	insertion	non	uniforme	uniforme
-	20%	12.5%	10.5%	1	op	insertion	oui	éligible	uniforme
	20%	12.5%	10.5%	2	op	insertion	si possible	uniforme	uniforme
	20%	12.5%	10.5%	3	op	échange	oui	éligible	uniforme
	20%	12.5%	10.5%	4	op	échange	si possible	uniforme	uniforme
	20%	12.5%	10.5%	5	op	insertion	non	uniforme	uniforme
-	-	6.25%	5.25%	6	paquet	insertion	oui	éligible	uniforme
		6.25%	5.25%	7	paquet	insertion	si possible	uniforme	uniforme
		6.25%	5.25%	8	paquet	échange	oui	éligible	uniforme
		6.25%	5.25%	9	paquet	échange	si possible	uniforme	uniforme
		6.25%	5.25%	10	paquet	insertion	non	uniforme	uniforme
		6.25%	5.25%	11	paquet	échange	non	identique	tard
-	-	-	2.62%	12	groupe	insertion	oui	éligible	uniforme
			2.62%	13	groupe	insertion	si possible	uniforme	uniforme
			2.62%	14	groupe	échange	oui	éligible	uniforme
			2.62%	15	groupe	échange	si possible	uniforme	uniforme
			2.62%	16	groupe	insertion	non	uniforme	uniforme
2.62%	17	groupe	échange	non	identique	tard			

FIG. 7.5 – Définitions des structures complexes de voisinages.

12 (respectivement 14) insertion (respectivement échange) avec un groupe de même famille sur une des machines éligibles ;

13 (respectivement 15) l'entité insérée (respectivement échangée) doit changer de machine, sur la nouvelle machine choisie uniformément, le déplacement est plutôt visé vers une entité de la même famille ;

16 insertion sur une autre machine ;

17 inverser avec le groupe précédent sur la même machine.

Cette explication a été faite en se référant aux déplacements de groupes, mais elle est transposable aux déplacements de paquets et d'opérations.

7.3 Expérimentation

7.3.1 Génération des jeux de données

Pour évaluer nos propositions de structure de voisinages, plusieurs jeux de données ont été générés stochastiquement à l'intérieur de fenêtres réalistes, pour le cas d'application industriel. Il s'agit de mêmes jeux de données que ceux présentés dans le chapitre concernant les heuristiques à base de règles (6.5.1).

7.3.2 Réglage des paramètres de l'algorithme de recuit simulé

Pour pouvoir comparer les voisinages proposés, l'algorithme de recuit simulé doit être paramétré de façon identique. Dans tous les cas, la solution initiale est fournie par l'heuristique *PML, ATCTRS* (1, 1). Tout d'abord, le recuit simulé démarre avec une phase de trempe (ou de descente) sur 100 itérations. De cette façon, nous pouvons évaluer la variation moyenne du critère (retard total) pour la structure de voisinage considérée. Cette valeur nous permet d'initialiser la température de recuit, de telle sorte que la probabilité d'acceptation d'un voisinage soit de 80 % au départ du recuit. Le changement de niveau de température aura lieu après 400 itérations ou 80 voisinages acceptés. La température suit alors une

loi géométrique de raison 0,95. Le critère d'arrêt de l'algorithme est fixé à trois paliers de températures sans acceptation, ou après 15 000 itérations. Ce paramétrage permet de limiter le temps de calcul et d'obtenir des premiers résultats sur la qualité relative de chacun des voisinages. Cependant, nous sommes conscients de l'importance de cette limitation imposée à l'algorithme de recuit simulé. Ainsi, à partir de ce premier classement des différents voisinages, nous avons effectué un « vrai » recuit simulé sur le meilleur des voisinages. Ce deuxième recuit simulé n'a pas de limite d'itération et son critère d'arrêt est toujours de trois paliers sans acceptation. Cependant, la phase de recuit est réalisée avec un coefficient de décroissance de température de 0,98 et un changement de palier après 1 000 itérations ou 400 voisinages acceptés. Nous pourrions ainsi comparer l'apport lié au voisinage et celui lié au temps de calcul, étant donné que les différents voisinages sont testés sur les mêmes jeux de données.

7.4 Résultats

Pour permettre une lecture graphique des résultats, nous traçons trois types de courbes pour chaque algorithme testé :

le taux de résolution en fonction de la somme des retards il mesure la performance de l'algorithme par rapport à l'objectif de minimisation du retard ;

le taux de résolution en fonction du nombre d'itérations (`nb_iter`) il mesure la proportion des problèmes pour lesquels le recuit a convergé (arrêt après trois paliers de température sans acceptation) en fonction du nombre d'itérations porté en abscisse ;

le taux de résolution en fonction de l'itération de la meilleure solution (`iter_best`) il mesure la proportion des problèmes pour lesquels la meilleure solution trouvée a été obtenue avant une itération portée en abscisse.

Combinés, ces deux derniers taux de résolution (`nb_iter` et `best_iter`) nous renseignent sur la rapidité de convergence de l'algorithme.

7.4.1 Charge moyenne (70 jobs)

7.4.1.1 Sans contrainte de validation de fin de temps de préparation

Sur la figure 7.6, nous observons que tous les recuits utilisés donnent d'excellents résultats, car pour un retard moyen d'une heure par job, l'ensemble des problèmes sont résolus, quel que soit le type de voisinage ou le paramétrage du recuit. L'amélioration par rapport à l'heuristique de départ (*ATCTRS*(1, 1)) est très importante, et en grande partie possible grâce à la phase initiale de descente (trempe). Avec la figure 7.7, nous remarquons que le meilleur type de voisinage (OP+PA+GR, celui qui utilise les déplacements d'opérations, de paquets et de groupes) converge en moins de 15 000 itérations sur tous les problèmes en utilisant un coefficient de décroissance de température de 0,95 (recuit rapide). Ainsi, un recuit rapide avec un bon voisinage permet de résoudre parfaitement les problèmes.

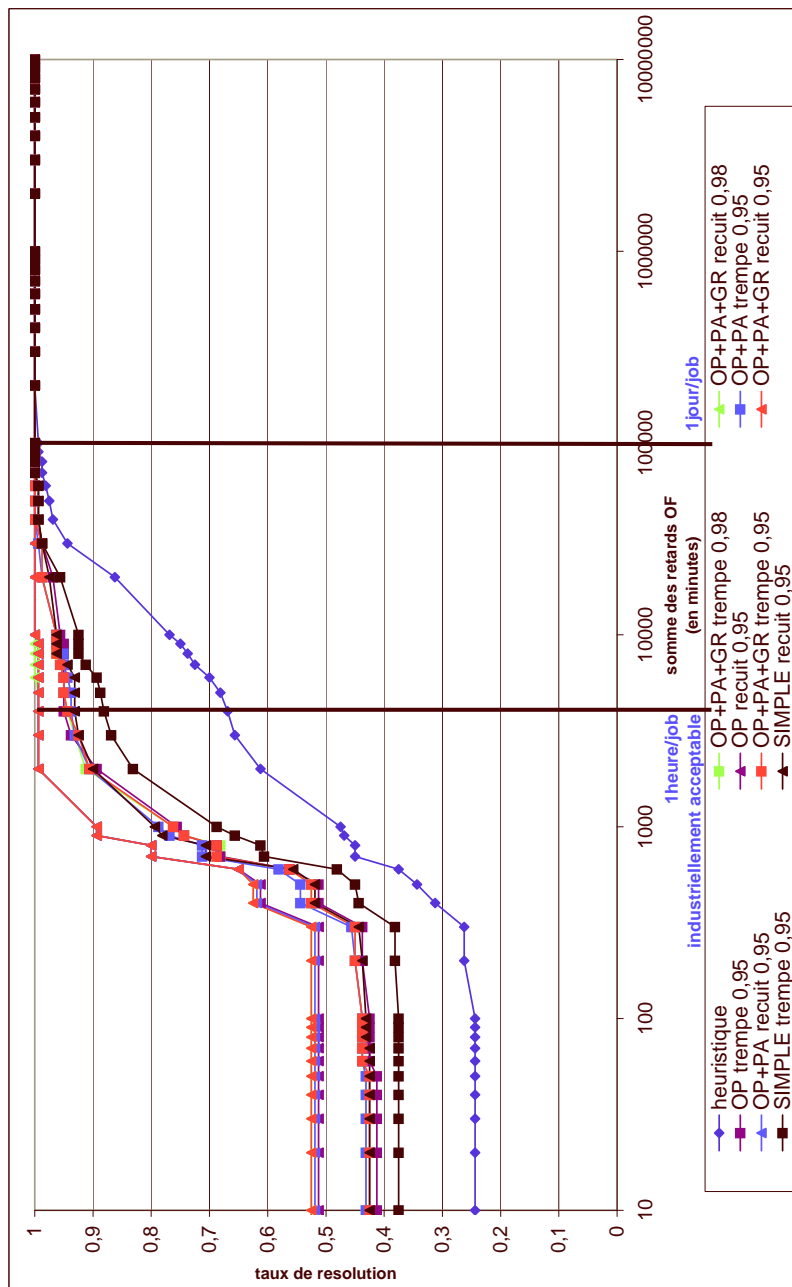


FIG. 7.6 – Comparaison de la qualité de la résolution pour une charge moyenne sans validation de fin de set-up.

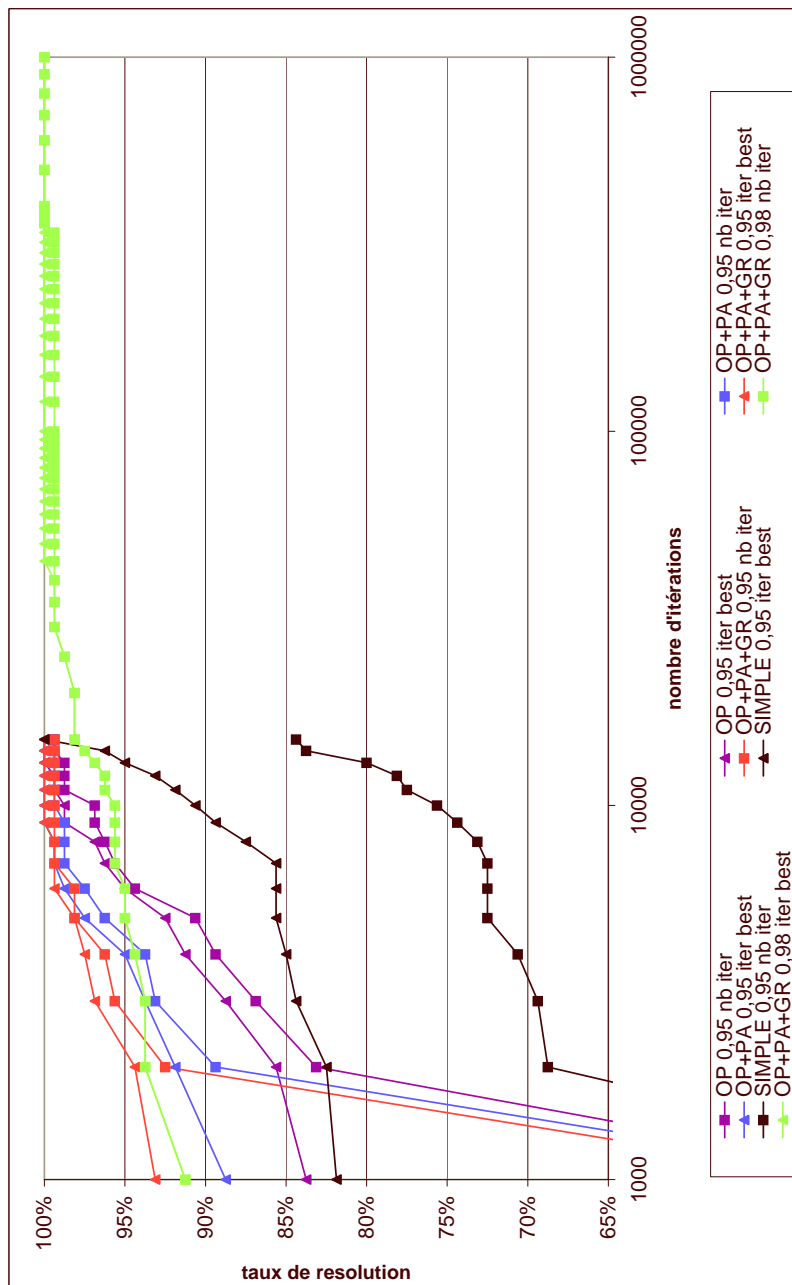


FIG. 7.7 – Comparaison de la vitesse de résolution pour une charge moyenne sans validation de fin de set-up.

7.4.1.2 Avec contrainte de validation de fin de temps de préparation

Si nous rajoutons maintenant la contrainte de validation de fin de set-up, nous voyons sur la figure 7.8 que seuls les voisinages adaptés au problème donnent des résultats performants. En effet, le voisinage simple se révèle clairement incapable de résoudre ces problèmes de façon satisfaisante. Si nous considérons également les résultats de la figure 7.9, il apparaît que le voisinage OP+PA+GR converge pour tous les problèmes en moins de 15 000 itérations. Il est donc encore suffisant d'utiliser un recuit rapide (décroissance à 0,95) pour obtenir d'excellentes performances.

7.4.2 Charge forte (140 jobs)

Précédemment, nous avons vu que le taux de résolution des heuristiques s'effondrait lors du passage à une charge plus forte. Nous trouvons cela compréhensible en raison de la plus grande difficulté des problèmes (deux fois plus de charge, alors que le délai moyen entre l'arrivée et le besoin est toujours de 10 jours), mais nous ne savions pas dire si les heuristiques s'effondraient en raison de l'absence de meilleures solutions (les résultats des heuristiques sont proches de l'optimum) ou en raison de leurs limites intrinsèques. Les résultats sur les méta-heuristiques vont nous permettre d'appréhender cette question.

7.4.2.1 Sans contrainte de validation de fin de temps de préparation

L'analyse de la figure 7.10 montre qu'en l'absence de contrainte de validation de fin de set-up, les heuristiques sont très loin des résultats atteints par les méta-heuristiques. L'amélioration est très importante puisque pour un retard moyen d'une heure par job, le taux de résolution passe de moins de 10 % à plus de 70 % pour la meilleure. Les meilleurs résultats sont donnés par les voisinages OP+PA+GR. Nous voyons que le voisinage simple donne des résultats - même après recuit - inférieurs aux seules descentes avec des voisinages adaptés. Nous pouvons également noter une nette séparation entre les différents voisinages. En effet, pour le retard moyen d'une heure par job, le taux de résolution passe de 45 % avec un voisinage OP, à un peu plus de 60 % avec OP+PA et près de 70 % avec OP+PA+GR, pour des recuits rapides (0,95) et limités à 15 000 itérations. Nous analysons donc ici l'apport de l'intelligence du voisinage pour la résolution du problème. Cette amélioration est à mettre en regard de l'apport d'un recuit plus lent (0,98) et illimité. Pour le meilleur voisinage, l'apport de ce nouveau paramétrage du recuit est de l'ordre de 10 % autour du retard moyen d'une heure, mais est plus faible voire inexistant pour des valeurs de retard inférieures et supérieures. En revanche, cette légère amélioration est faite au prix d'un temps de calcul beaucoup plus long (cf. figure 7.11), puisque le recuit lent et illimité ne converge pour tous les problèmes qu'après plusieurs centaines de milliers d'itérations, ce qui implique une multiplication du temps de calcul d'un facteur supérieur à 10. En plus de justifier les efforts sur le voisinage plutôt que sur le paramétrage du recuit, ces constatations nous permettent de supposer - sans pouvoir le démontrer - que nous sommes proches de l'optimum. En effet, il est clair que l'ensemble des problèmes ne sont pas résolubles avec un retard moyen d'une heure, même au prix d'une augmentation très importante des itérations effectuées.

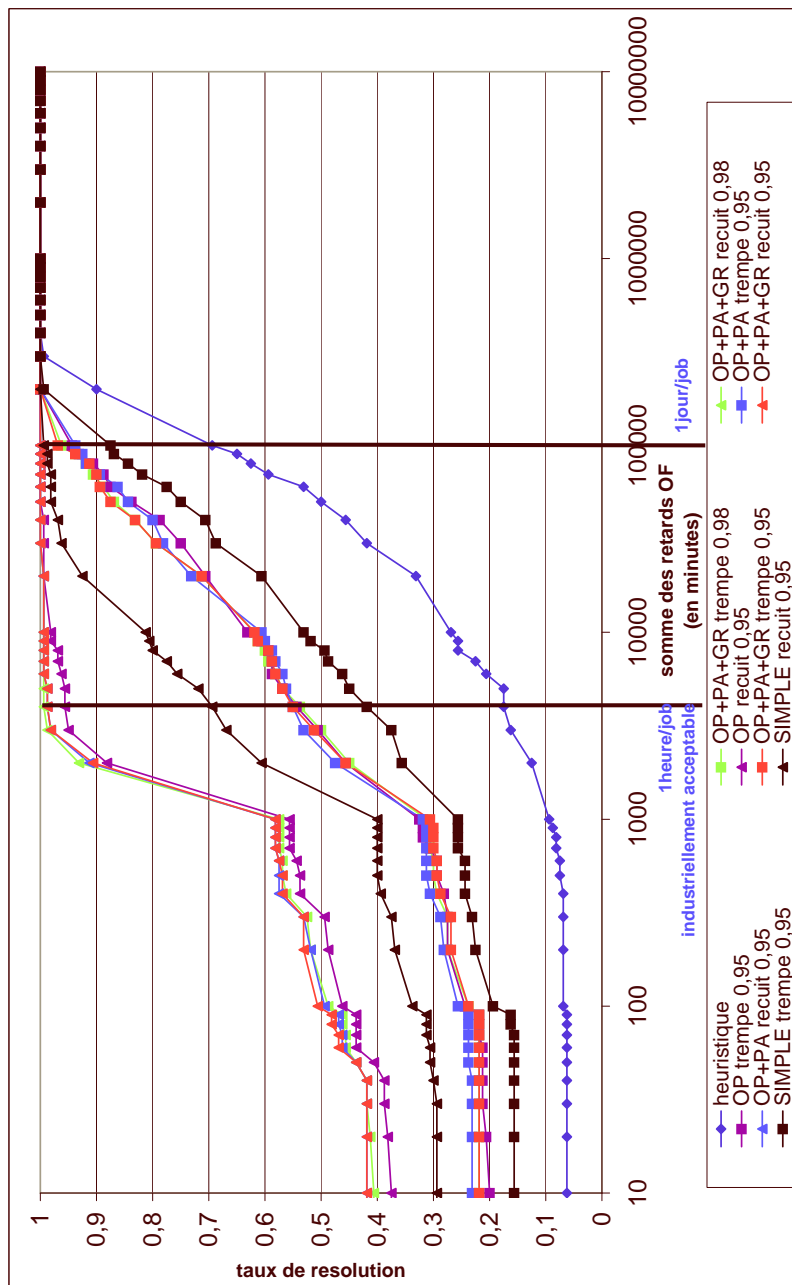


FIG. 7.8 – Comparaison de la qualité de la résolution pour une charge moyenne avec validation de fin de set-up.

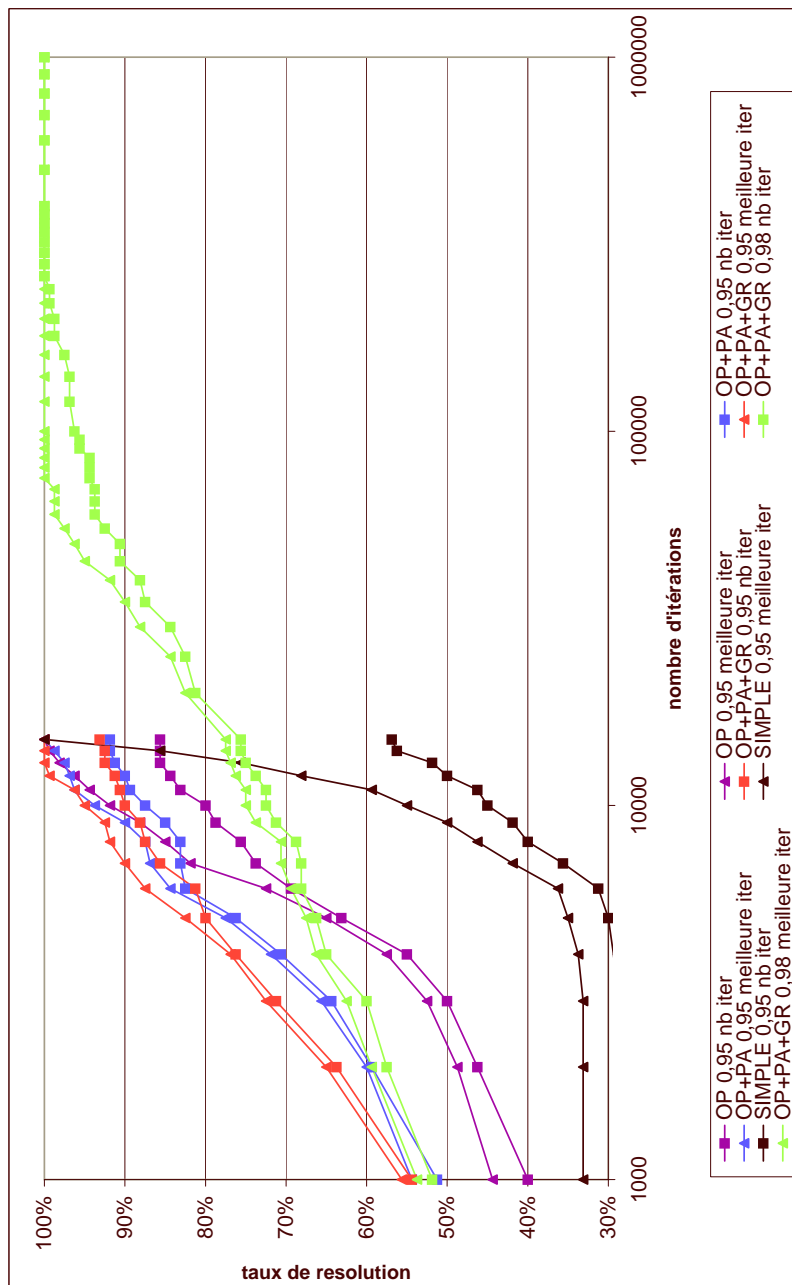


FIG. 7.9 – Comparaison de la vitesse de résolution pour une charge moyenne avec validation de fin de set-up.

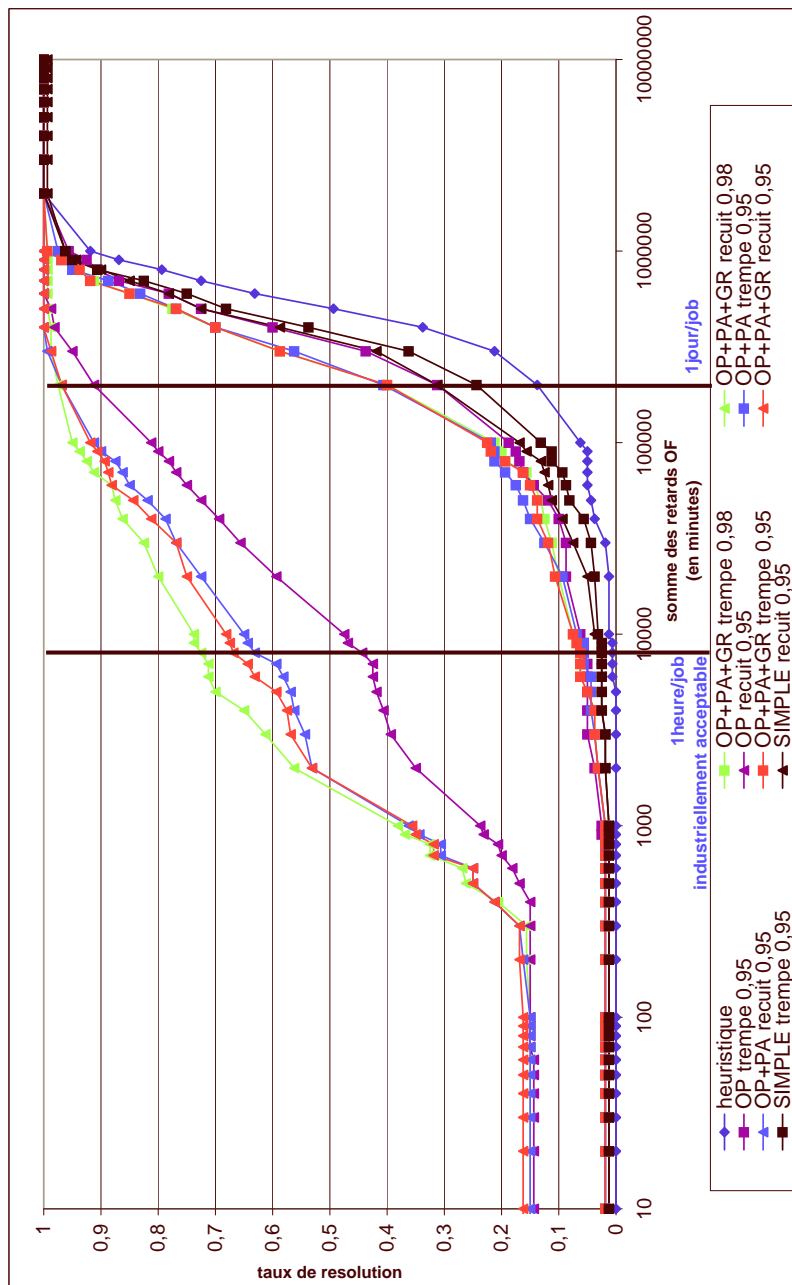


FIG. 7.10 – Comparaison de la qualité de la résolution pour une charge forte sans validation de fin de set-up.

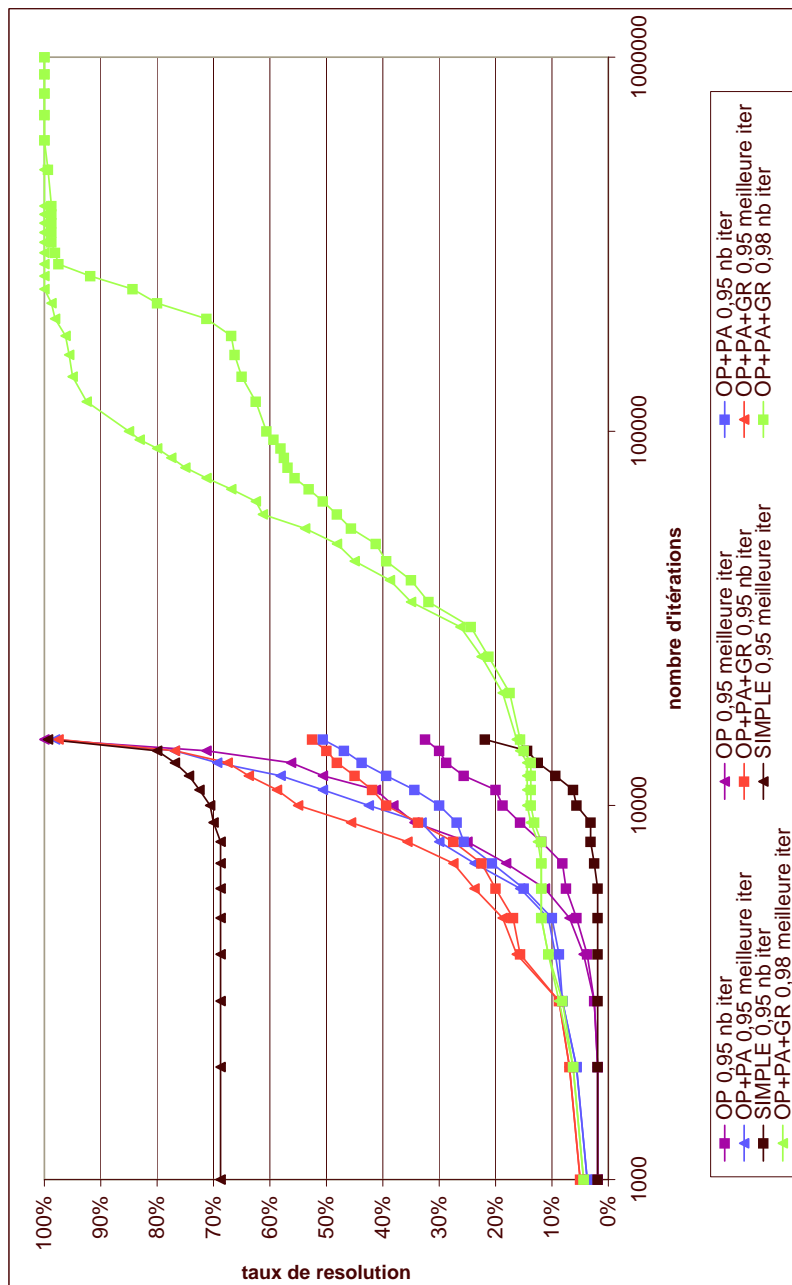


FIG. 7.11 – Comparaison de la vitesse de résolution pour une charge forte sans validation de fin de set-up.

7.4.2.2 Avec contrainte de validation de fin de temps de préparation

L'observation des figures 7.12 et 7.13, nous donne les mêmes dominances entre voisinages que précédemment, avec la légère dégradation liée à la présence d'une contrainte supplémentaire.

7.4.3 Conclusions

On constate l'impact de la définition du voisinage sur la qualité des solutions obtenues. D'abord, la phase de trempe améliore significativement la meilleure règle de priorité trouvée. Ensuite, la phase de recuit surpasse la phase de trempe. La valeur de l'amélioration dépend de la difficulté des problèmes et du type de voisinage utilisé. Pour la configuration avec une charge normale (70 jobs), les différentes structures de voisinages utilisées sont relativement proches, à l'exception du voisinage sans adaptation particulière au problème. Au contraire, pour la configuration d'une charge importante (140 jobs), une classification apparaît entre les différentes structures de voisinages. La structure simple donne les moins bons résultats des phases de recuit. Ensuite, la structure agissant seulement sur les opérations apporte une amélioration significative. L'intérêt de la définition de voisinages adaptés au problème traité apparaît donc clairement. Les deux dernières structures donnent des résultats comparables, sensiblement meilleurs que la structure uniquement basée sur des mouvements d'opérations. L'utilisation d'un recuit plus lent et illimité apporte une amélioration légère au prix d'un nombre d'itérations multiplié par un facteur supérieur à 10. La mise en œuvre du recuit nous a permis d'améliorer très nettement le taux de résolution du problème. Nous obtenons donc des outils performants qui nous permettent d'envisager une application industrielle.

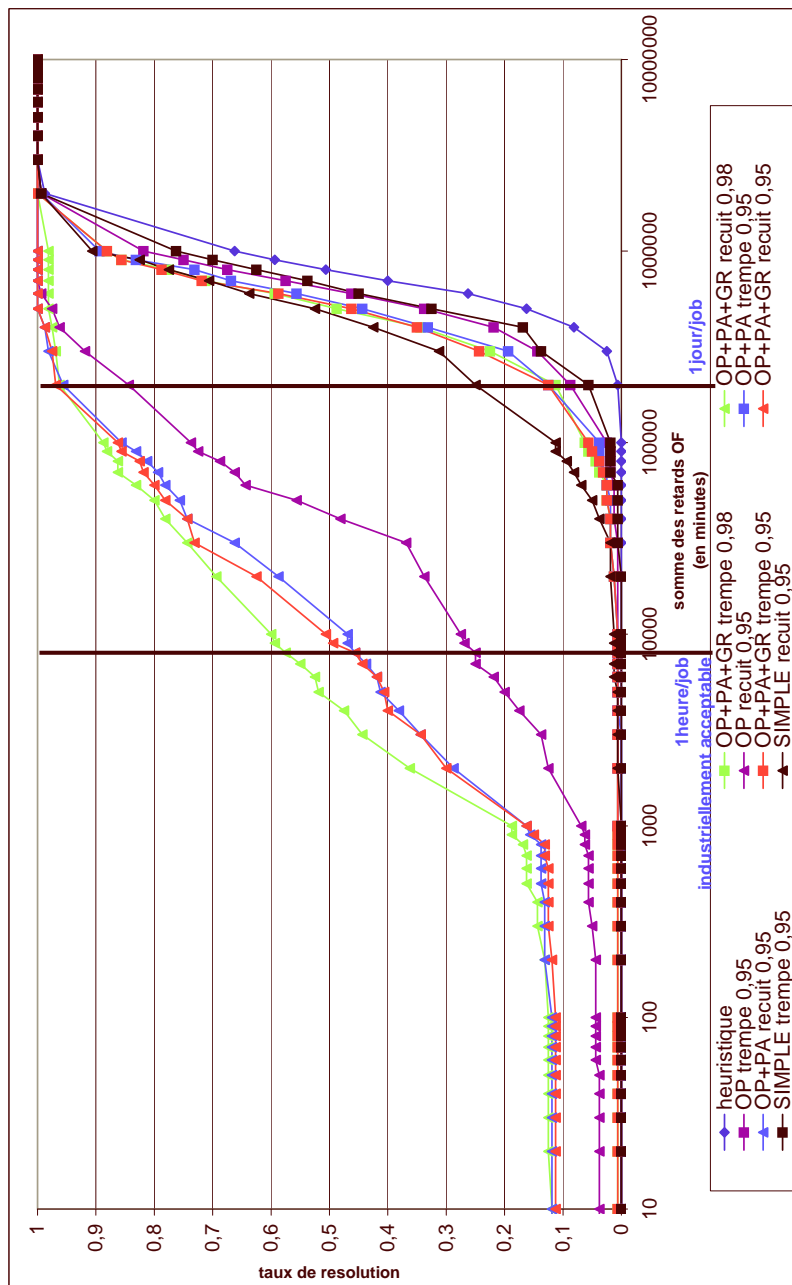


FIG. 7.12 – Comparaison de la qualité de la résolution pour une charge forte avec validation de fin de set-up.

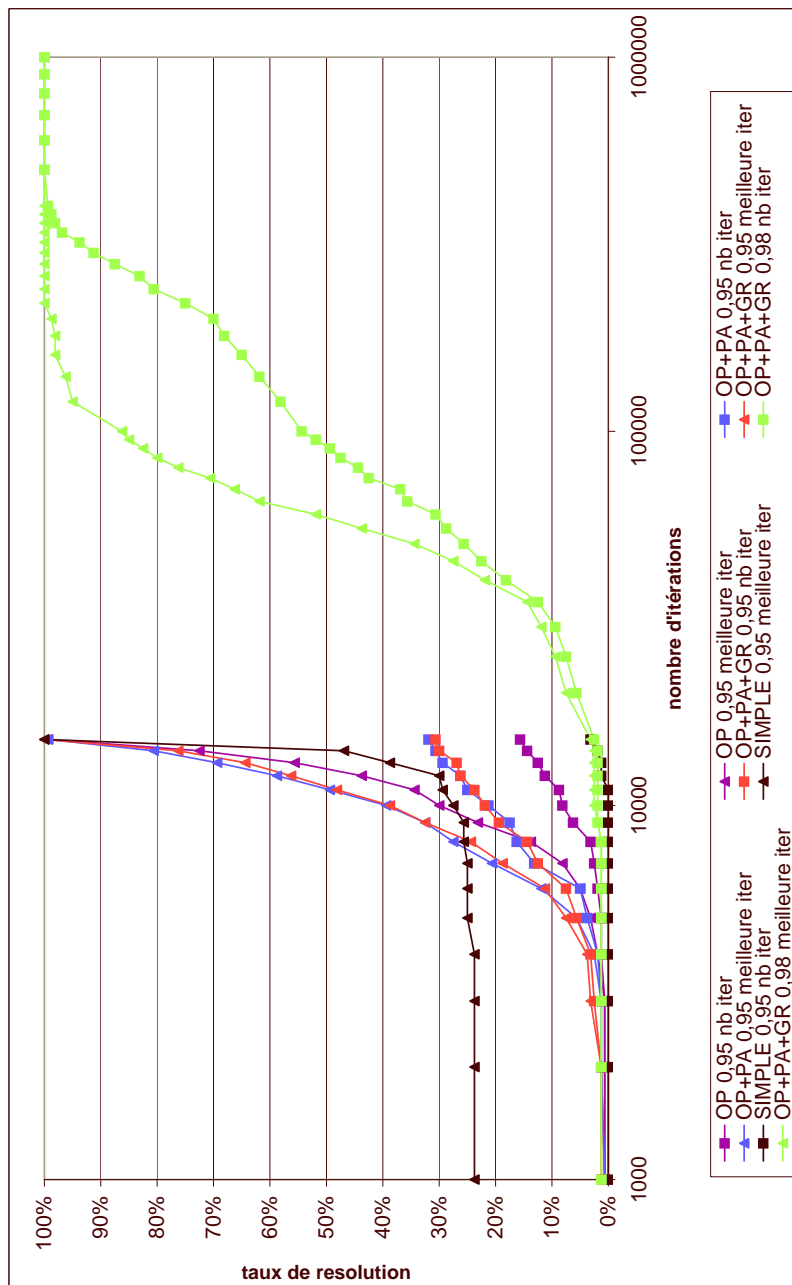


FIG. 7.13 – Comparaison de la vitesse de la résolution pour une charge forte avec validation de fin de set-up.

Synthèse de la partie

Dans cette partie, nous avons proposé une modélisation du problème d'ordonnancement issu de notre cas d'application industriel. Ce problème fait clairement partie de la classe des problèmes d'ordonnancement à machines parallèles. Cependant, l'ensemble des contraintes est original et aucune méthode de résolution n'a été proposée jusqu'alors. De ce fait, nous avons proposé deux méthodes de résolution. D'une part, une heuristique basée sur des listes de priorités nous a permis d'identifier une règle se comportant correctement pour ce problème : ATCTRS. D'autre part, afin d'améliorer notablement les résultats obtenus, nous avons proposé une résolution basée sur une méta-heuristique : le recuit simulé. Cette technique a donné des résultats pertinents à partir du moment où le système de voisinage utilisé correspond à la réalité du problème au lieu d'être très générique. Nous voyons également qu'elle permet d'obtenir de bons résultats en un nombre d'itérations raisonnable, nous permettant d'envisager une application industrielle de ces techniques. Cependant, nous allons être confrontés à une mise en pratique délicate, avec un ERP.

Chapitre 8

Conclusion générale

8.1 Bilan des apports scientifiques

En partie I, nous avons proposé une méthode aidant à l'amélioration d'un système industriel afin d'identifier et de traiter ses dysfonctionnements. Cette contribution prend tout son sens dans le cas d'un système industriel où les dysfonctionnements ne sont pas évidents. Elle résulte de la mise en relation de deux courants de pensée du génie industriel ; la modélisation d'entreprise d'une part et l'amélioration de systèmes industriels d'autre part. Ces deux approches ne s'opposent absolument pas, mais se complètent pour permettre d'aborder un projet d'amélioration de système industriel dans sa globalité : de la découverte des problèmes à la mise en place des solutions. Pour ce faire, nous avons retenu cinq points de vue de la modélisation d'entreprise et pour chacun d'eux nous avons choisi des modèles de représentation. La grille d'analyse correspond à une succession de questions pour critiquer les modèles pour chacun des points de vue et des inter-points de vue. En outre, des démarches et des instruments (regroupant les outils et les méthodes) issus de l'amélioration de systèmes industriels sont répartis sur cette grille, permettant de rapprocher les dysfonctionnements identifiés, des instruments pour y remédier ainsi que des démarches possibles pour conduire le changement. Un cas d'application sur les laboratoires de contrôle qualité en industrie pharmaceutique montre la multiplicité des démarches et des instruments utilisés.

Le cas d'application précédent a mis en exergue un goulet. Il en résulte un problème original d'ordonnement d'atelier à machines parallèles, en partie II. Celui-ci est soumis à plusieurs ressources secondaires nécessaires, ainsi qu'à des temps de préparation particulièrement importants. Nous avons proposé une approche heuristique et une approche méta-heuristique pour en résoudre les instances industrielles avec un nombre important de machines et de jobs. Pour les heuristiques, nous héritons de la règle ATC développée pour le critère de la somme des retards. Elle a ensuite été étendue aux machines parallèles identiques avec temps de préparation, sous le nom d'ATCS. Nous héritons également des règles basées sur la flexibilité des opérations et des machines, comme LFO et LFM. Nous avons proposé les règles ATCTRS et ATCTRSF, réalisant un compromis entre le retard d'une opération, une bonne occupation de la machine et pour ATCTRSF, une notion de flexibilité des opérations. Des expérimentations ont été réalisées sur des jeux de données générés aléatoirement dans des plages de valeurs réalistes. Une analyse de donnée a été menée sur ces résultats. Nous avons pu en conclure qu'ATCTRS était l'heuristique la plus performante et que son extension en ATCTRSF n'était pas

très pertinente, en regard du manque d'impact du facteur de flexibilité sur la performance obtenue. Nous avons donc mis en évidence une heuristique intéressante pour ce problème, mais qui reste néanmoins limitée dans sa performance. Notre contribution sur l'approche méta-heuristique se traduit par la proposition de quatre structures de voisinages. Elles combinent des mécanismes élémentaires qui se distinguent principalement par la taille des entités déplacées (opérations ou ensembles d'opérations) et par le type de déplacement (échange ou insertion). Au bilan, la structure de voisinage la plus complexe permet d'obtenir de bons résultats, même avec un recuit au paramétrage rapide (décroissance de température géométrique de raison 0,95 au lieu de 0,98 pour un recuit plus lent). Nous observons également un écart très important entre les heuristiques et les méta-heuristiques.

8.2 Bilan concernant la problématique industrielle

La problématique industrielle inhérente à cette thèse concerne les laboratoires de contrôle qualité en production pharmaceutique. Ce problème complexe a nécessité le développement d'une approche globale pour sa résolution, correspondant à notre méthode de la partie I. Par cette approche, nous avons pu mettre en lumière une série de dysfonctionnements qui n'étaient pas évidents au départ du projet et de les résoudre. Nous avons eu des résultats industriels probants, que ce soit sur la réduction du temps de cycle lié au contrôle qualité, des coûts de fonctionnements du laboratoire de contrôle ou encore de certains stocks.

Le problème d'ordonnancement nous a conduit à mettre en œuvre industriellement des outils de pilotage fin de l'activité, ainsi qu'à réfléchir à des solutions organisationnelles pour relâcher certaines contraintes. Les résultats obtenus indiquent qu'un gain potentiel existe en ce qui concerne les aspects de délais, mais il doit être mis en balance avec son accessibilité.

8.3 Perspectives

Comme tout travail scientifique, celui-ci n'est pas clos. Des perspectives s'ouvrent sur chacune des parties.

En premier lieu, l'analyse des systèmes industriels proposée peut être considérée comme un point de départ à l'intégration de la modélisation d'entreprise et de l'amélioration de systèmes. En effet, cette proposition pourrait être complétée, grâce à l'expérience issue d'autres mises en pratique : de nouveaux points de vue, des modèles différents, ainsi que des questions supplémentaires. Son champ d'application pourrait être étendu à d'autres systèmes socio-techniques que les systèmes industriels, avec des limites et des compléments à préciser. L'impact de l'utilisation de modèles plus détaillés (par exemple de la simulation de flux) devrait également être approfondie. En outre, cette proposition pourrait également être plus finement intégrée avec les courants scientifiques du pilotage par la performance et de la gestion de projet. Enfin, des travaux récents sur l'urbanisation des systèmes d'information pourraient permettre de faire avancer notre proposition vers un modèle de pilotage d'un système industriel basé sur l'évolution permanente du système en fonction des fluctuations de son environnement.

En second lieu, le problème d'ordonnancement étudié l'a été dans un contexte statique. Il est bien évident qu'en pratique, il se pose dans un contexte dynamique qui n'a pas été abordé ici. Cette perspective permettrait de juger la performance et la robustesse aux aléas des méthodes utilisées et de leurs limites dans un contexte plus turbulent. Il serait également intéressant de mettre en œuvre les méthodes proposées sur des problèmes standard en relâchant certaines contraintes de notre problème ou en essayant de les étendre à d'autres catégories de problèmes, tels que les flow-shops hybrides. Une analyse de données - similaire à celle faite pour les heuristiques - pourrait être réalisée sur la sensibilité au critère d'ordonnancement pour les résultats liés au recuit simulé. Enfin, d'autres heuristiques pourraient être recherchées pour améliorer ATCTRS et se rapprocher des résultats du recuit simulé.

Bibliographie

- Aguilera, L. M. (1993). *Ordonnancement de production avec coûts de changements dépendant de la séquence*. Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Akao, Y. (2004). *Hoshin Kanri : Policy Deployment For Successful TQM*. Productivity Press Inc.
- Bank, J. et Werner, F. (2001). Heuristic algorithms for unrelated parallel machine scheduling with a common due date, release dates, and linear earliness and tardiness penalties. *Mathematical and Computer Modelling*, 33 : 363–383.
- Baptiste, P. et Roubellat, F., editors (1994). *Journées d'étude du GDR Automatique sur Ordonnancement et entreprise : applications concrètes et outils pour le futur*.
- Berrah, L., Clivillé, V., Harzallah, M., Haurat, A., et Vernadat, F. (2001). *PETRA : un guide méthodologique pour une démarche de réorganisation industrielle*. Université de Savoie - Université de Metz, <http://www.listic.univ-savoie.fr/projet/petra/>.
- Bhaskaran, K. et Pinedo, M. (1992). *Handbook of Industrial Engineering*, chapitre Dispatching, pages 2182–2198. Institute of Industrial Engineers.
- Bitton, M. (1990). *ECOGRAI : méthode de conception et d'implantation de systèmes de mesure de performance pour organisations industrielles*. Thèse, Université de Bordeaux I.
- Blazewicz, J., Lenstra, J. K., et Kan, A. H. G. R. (1983). Scheduling subject to resource constraints : classification and complexity. *Discrete applied mathematics*, 5(1) : 11–24.
- Boucon, D. (1991). *Ordonnancement d'atelier : aide au choix de règles de priorité*. Thèse, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse.
- Bouroche, J.-M. et Saporta, G. (2002). *L'analyse des données*. Presses Universitaires de France.
- BPMI (Consulté le 01/03/2005). Site internet de la business process management initiative qui travaille sur la standardisation du management des processus métiers. www.bpmi.org.
- Brucker, P. (1998). *Scheduling algorithms*. Springer-Verlag.
- Bufferne, J. et Corbrejaud, P. (2001). Comment associer ISO 9000 et TPM. *Le journal de la production*, 31.
- Centeno, G. et Armacost, R. (1997). Parallel machine scheduling with release time and machine eligibility restrictions. *Computers and Industrial Engineering*, 33(1-2) : 273–276.

-
- Chen, D., Vallespir, B., et Doumeingts, G. (1997). GRAI integrated methodology and its mapping onto generic enterprise reference architecture and methodology. *Computers in industry*, 33(2-3) : 391–398.
- Chen, J.-F. et Wu, T.-H. (2004). Total tardiness minimization on unrelated parallel machine scheduling with auxiliary equipment constraints. *International Journal of Management Science*.
- Chen, Z. L. et Powell, W. B. (2003). Exact algorithms for scheduling multiple families of jobs on parallel machines. *Naval research logistics*, 50 : 823–840.
- Cheng, T. et Sin, C. (1990). A state-of-the-art review of parallel-machine scheduling. *European Journal of Operational Research*, 47 : 271–292.
- Cohen, S. et Roussel, J. (2004). *Strategic Supply-Chain Management : The 5 Disciplines for Top Performance*. McGraw-Hill.
- Daniels, R., Hoopes, B., et Mazzola, J. (1996). Scheduling parallel manufacturing cells with resource flexibility. *Management Science*, 42(9) : 1260–1276.
- Daniels, R., Hoopes, B., et Mazzola, J. (1997). An analysis of heuristics for the parallel-machine flexible-resource scheduling problem. *Annals of Operations Research*, 70 : 439–472.
- Daniels, R., Hua, S., et Webster, S. (1999). Heuristics for parallel-machine flexible-resource scheduling problems with unspecified job assignment. *Computers and Operations Research*, 26 : 143–155.
- Darras, F. (2004). *Proposition d'un cadre de référence pour la conception et l'exploitation d'un progiciel de gestion intégré*. Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- de Rosnay, J. (1977). *Le microscope*. Seuil.
- Doumeingts, G. (1984). *La méthode GRAI*. Thèse, Université de Bordeaux I.
- Doumeingts, G. (2004). Formation à la méthodologie GRAI. Technical report, Graisoft.
- Dreo, J., Petrowski, A., Siarry, P., et Taillard, E. (2003). *Méta-heuristiques pour l'optimisation difficile*. Eyrolles.
- Du, J. et Leung, J. Y.-T. (1990). Minimizing total tardiness on one machine is np-hard. *Mathematics of Operations Research*, 15(3) : 483–495.
- Dupuy, M., Lamothe, J., Gaborit, P., et Dupont, L. (2004). Ordonnancement à machines parallèles à usages multiples avec ressources secondaires, temps de préparation et calendrier de disponibilité. In *5^e conférence francophone de MODélisation et SIMulation (MOSIM 2004) : modélisation et simulation pour l'analyse et l'optimisation des systèmes industriels et logistiques*.
- Dupuy, M., Lamothe, J., Gaborit, P., et Dupont, L. (2005). Efficient neighbors in a simulated annealing problem to optimize the lead time in a parallel multipurpose machine scheduling problem with setup and calendar constraints. In *International conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*.
- ENV 40003 (2000). Enterprise integration - framework for entreprise modelling. Comité Européen de Normalisation.

-
- Eom, D. H., Shin, H. J., Kwun, I. H., Shim, J. K., et Kim, S. S. (2002). Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependant family set-up times. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 19 : 926–932.
- Erschler, J. (1976). *Analyse sous contraintes et aide à la décision pour certains problèmes d'ordonnancement*. Thèse, Université Paul Sabatier - Toulouse.
- Fleury, G. (1994). La méthode du recuit simulé : applications du recuit simulé et de ses variantes à des problèmes d'ordonnancement. In *Journées d'étude du GDR Automatique sur Ordonnancement et entreprise : applications concrètes et outils pour le futur*, pages 69–95.
- Fleury, G. et Gourgand, M. (1998). Genetic algorithms applied to workshop problems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 11(2) : 183–192.
- Flipo-Dhaenens, C. (1998). *Optimisation d'un réseau de production et de distribution*. Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Fowler, J. W., Horng, S. M., et Cochran, J. K. (2003). A hybridized genetic algorithm to solve parallel machine scheduling problems with sequence dependent set-up. *International journal of industrial engineering*, 10(3) : 232–243.
- Gabrel, V. (1995). Scheduling jobs within time windows on identical parallel machines : new model and algorithms. *European Journal of Operational Research*, 83 : 320–329.
- Gourc, D. et Pourcel, C. (2005). *Modélisation d'entreprise par les processus*. Cépadués.
- Grua, H. et Segonzac, J.-M. (1999). *Production par les flux : configurer les processus industriels autour des besoins clients*. Dunod.
- Hammer, M. et Champy, J. (1993). *Le reengineering : réinventer l'entreprise pour une amélioration spectaculaire de ses performances*. Dunod.
- Hu, P. C. (2004). Minimising total tardiness for the worker assignment scheduling problem in identical parallel-machine models. *International journal of advanced manufacturing technology*, 23 : 383–388.
- Imai, M. (1998). *Gemba Kaizen : l'art de manager avec le bon sens*. Éditions JV et DS.
- ISO DIS 10303-11 (1992). The EXPRESS language reference manual. International Organisation for Standardisation.
- Jackson, J. (1955). Scheduling a production line to minimize the maximum tardiness. *Management Science Research Project*.
- Japan Institute of Plant Maintenance (1997). Introduction à la TPM. Usinor Institut Qualité et Management.
- Johnson, S. (1954). Optimal two- and three-stage production schedules with set-up times included. *Naval Research Logistic Quaterly*, 1 : 61–68.
- Kaplan, R. S. et Norton, D. P. (1996). *Le tableau de bord prospectif*. Éditions d'organisation.
-

-
- Kedad-Sidhoum, S. (1997). *Résolution de problèmes de partitionnement généralisé par des méthodes d'optimisation globale à base de déplacements stochastiques : application à l'ordonnancement à machines parallèles*. Thèse, École Centrale Paris.
- Kellerer, H. et Strusevich, V. A. (2004). Scheduling problems for parallel dedicated machines under multiple resource constraints. *Discrete applied mathematics*, 133 : 45–68.
- Kettinger, W., Teng, W. J., et Guha, S. (1997). Business process change, a study of methodologies, techniques and tools. *Management Information Systems Quarterly*, pages 55–80.
- Kim, D.-W., Kim, K.-H., Jang, W., et Chen, F. (2002). Unrelated parallel machine scheduling with set-up times using simulated annealing. *Robotics and Computers Integrated Manufacturing*, 18 : 223–231.
- Koulamas, C. (1997). Decomposition and hybrid simulated annealing heuristics for the parallel-machine total tardiness problem. *Naval Research Logistics*, 44 : 109–125.
- Koulamas, C., Antony, S., et Jean, R. (1994). A survey of simulated annealing applications to operations research problems. *International Journal of Management Science*, 22(1) : 41–56.
- Laarhoven, P., Aarts, E., et Lenstra, J. (1992). Job shop scheduling by simulated annealing. *Operations research*, 40(1) : 113–125.
- Laudoyer, G. (2000). *La certification ISO 9000 : un moteur pour la qualité*. Éditions d'organisation.
- Lauras, M. (2004). *Méthodes de diagnostic et d'évaluation de performance pour la gestion de chaînes logistiques*. Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Lee, H. et Billington, C. (1993). Material management in decentralized supply-chain. *Operation research*, 41(5).
- Lee, Y. et Pinedo, M. (1997). Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent set-up times. *European Journal of Operational Research*, 100 : 464–474.
- LEEM (Consulté le 01/03/2005). Site internet du syndicat des entreprises du médicament. www.leem.org.
- Liaw, C.-F., Lin, Y.-K., Cheng, C.-Y., et Chen, M. (2003). Scheduling unrelated parallel machines to minimize total weighted tardiness. *Computers and Operations Research*, 30 : 1777–1789.
- Lissandre, M. (1990). *Maîtriser SADT*. Armand Colin.
- Lopez, P. et Roubellat, F. (2001). *Ordonnancement de la production*. Hermès.
- Low, C. (2004). Simulated annealing for flow shop scheduling problems with unrelated machines. *Computers and Operations Research*.
- Lutherer, E. (1996). *Méthodes et outils pour la modélisation de la productique*. Thèse, INSA Lyon.
- Mahmoudi, J., Gallaso, F., François, J., Lamothe, J., et Thierry, C. (2005). Cadre de classification des publications en supply-chain management. Technical report, SCMIP Supply-Chain MIDI-Pyrénées.
- Martin, A. et Synge, R. (1941). A new form of chromatogram employing two liquide phases. *Biochemistry Journal*, 35 : 1358–1368.

-
- Mauguière, P., Billaut, J.-C., et Bouquard, J.-L. (2003). Nouveaux problèmes à une machine avec périodes d'indisponibilité. In *École d'Automne de Recherche Opérationnelle*, pages 62–67.
- Mendes, A. S., Müller, F. M., França, P. M., et Moscato, P. (2002). Comparing meta-heuristic approaches for parallel machine scheduling problems. *Production planning and control*, 13(2) : 143–154.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., et Teller, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemistry Physics*, 21 : 1087–1092.
- Mintzberg, H. (1982). *Structure et dynamique des organisations*. Éditions d'organisation.
- Moigne, J.-L. L. (1973). *Les systèmes d'information dans les organisations*. Presses universitaires de France.
- NF E60-182 (2002). Indicateurs de performances. AFNOR Association Française de Normalisation.
- Ovacik, I. et Uzsoy, R. (1995). Rolling horizon procedures for dynamic parallel machine scheduling with sequence-dependent set-up times. *International Journal of Production Research*, 33(11) : 3173–3192.
- Panwalkar, S. et Iskander, W. (1977). A survey of scheduling rules. *Operation Research*, 25(1).
- Park, Y., Kim, S., et Lee, Y.-H. (2000). Scheduling jobs on parallel machines applying neural network and heuristic rules. *Computers and Industrial Engineering*, 38 : 189–202.
- PEA (2001a). Rapport d'analyse du benchmark pharmacie. Rapport technique, Groupe Euriware.
- PEA (2001b). Synthèse du diagnostic supply-chain de la branche pharmacie de Pierre Fabre. Rapport technique, Groupe Euriware.
- Perraud-Échalier, F. (1991). *Problèmes d'ordonnancement sur machines parallèles : apport du recuit simulé*. Thèse, Université Claude Bernard (Lyon).
- Pillet, M. (2004). *Six Sigma : comment l'appliquer*. Éditions d'organisation.
- Pinedo, M. (1995). *Scheduling : theory, algorithm and systems*. Prentice Hall.
- Pingaud, H. (2005). Modélisation d'entreprise. Cours Master Productique de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.
- Ravignon, L., Bescos, P.-L., Joalland, M., Bourgeois, S. L., et Malejac, A. (1998). *La méthode ABC/ABM : piloter efficacement une PME*. Éditions d'organisation.
- Ricart, A. (2000). *La rationalisation des petites séries de médicaments*. Thèse, Faculté de Pharmacie de Montpellier.
- Roboam, M. (1993). *La méthode GRAI : principes, outils, démarche et pratique*. Teknea.
- Saint-Gobain (Consulté le 01/03/2005). Site internet de l'entreprise Saint-Gobain. www.saint-gobain.com.
- Serifoglu, F. et Ulusoy, G. (1999). Parallel machine scheduling with earliness and tardiness penalties. *Computers and Operations Research*.
-

-
- Shiba, S., Graham, A., et Walden, D. (2003). *TQM : 4 révolutions du management*. Dunod.
- Shin, H. J. et Leon, V. J. (2004). Scheduling with product family set-up times : an application in TFT LCD manufacturing. *International journal of production research*, 42(20) : 4235–4248.
- Shingo, S. (1987). *Le système SMED : Une révolution en gestion de production*. Éditions d'organisation.
- Siary, P. (1994). La méthode du recuit simulé : théorie et applications. In *Journées d'étude du GDR Automatique sur Ordonnancement et entreprise : applications concrètes et outils pour le futur*, pages 47–67.
- Siebenborn, T. (2005). *Une approche de formalisation du processus de changement dans l'entreprise*. Thèse, Université de Savoie.
- Supply-chain Council (2000). Supply-chain operations reference-models 4.0. Edition Supply-chain Council.
- Tardieu, H., Rochfeld, A., et Collett, C. (2000). *La méthode MERISE*. Éditions d'organisation.
- Tian, P., Ma, J., et Zhang, D.-M. (1999). Application of the simulated annealing algorithm to the combinatorial optimisation problem with permutation property : an investigation of generation mechanism. *European Journal of Operational Research*, 118 : 81–94.
- Tranvouez, E. (2001). *IAD et ordonnancement : une approche coopérative du réordonnancement par systèmes multi-agents*. Thèse, Université d'Aix-Marseille III.
- Vairaktarakis, G. et Cai, X. (2003). The value of processing flexibility in multipurpose machines. *IIE Transactions*, 35 : 763–774.
- Vepsalainen, A. et Morton, T. (1987). Priority rules for job shops with weighted tardiness costs. *Management Science*, 33 : 1035–1047.
- Verdanat, F. (1999). *Techniques de modélisation en entreprise : applications aux processus opérationnels*. Economica.
- Webster, S. et Azizoglu, M. (2001). Dynamic programming algorithms for scheduling parallel machines with family set-up times. *Computers and Operations Research*, 28 : 127–137.
- Weng, M., Lu, J., et Ren, H. (2001). Unrelated parallel machine scheduling with set-up consideration and a total weighted completion time objective. *International Journal of Production Economics*, 70 : 215–226.
- Womack, J. et Jones, D. (1996). *Penser l'entreprise au plus juste*. Village mondial.
- Yalaoui, F. (2000). *Ordonnancement de la production en présence de machines alternatives*. Thèse, Université technologique de Troyes.
- Yugma, G. (2003). *Gestion dynamique d'un portefeuille de commandes*. Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble.

**Contributions à l'analyse des systèmes industriels
et aux problèmes d'ordonnement à machines parallèles flexibles :
application aux laboratoires de contrôle qualité en industrie pharmaceutique**

Dans cette thèse, nous abordons deux thématiques très différentes du génie industriel, mises en œuvre sur un même cas d'application industriel.

Tout d'abord, nous nous intéressons à l'analyse des systèmes industriels en intégrant deux courants de pensée : la modélisation d'entreprise d'une part, et l'amélioration des systèmes industriels d'autre part. Nous proposons une grille d'analyse/action basée sur la modélisation d'entreprise et permettant de mettre en évidence les dysfonctionnements du système industriel et les instruments d'amélioration à mettre en œuvre. Un cas d'application est développé sur notre problématique industrielle.

Ensuite, un problème d'ordonnement original est issu du précédent cas d'application. Il s'agit d'un atelier à machines parallèles flexibles et nécessitant des ressources secondaires (outils et intervention d'opérateurs), avec temps de préparation importants, mais sans contrainte de précedence entre les opérations d'un job. Nous étudions le critère de la somme des retards des jobs. Deux approches sont proposées pour ce problème : par heuristique et par recuit simulé. Pour l'approche heuristique, une règle appelée ATCTRS est développée. Elle cherche à réaliser un compromis entre le retard d'une opération et la bonne occupation de la machine. Pour l'approche par méta-heuristique, nous étudions principalement une structure de voisinage adaptée au problème à résoudre.

Mots-clés : modélisation d'entreprise, amélioration continue, ordonnancement, machines parallèles, contrôle qualité

**Contributions to the analysis of industrial systems
and to scheduling problems with flexible parallel machines:
application to quality control laboratories in pharmaceutical industry**

In this PhD thesis, we deal with two axes of industrial engineering, implemented on the same industrial case of study.

First of all, we focus on the analysis of industrial systems, using previous work concerning both enterprise modeling and continuous improvement. We propose an analysis/action grid based on enterprise modeling in order to identify the problems of the system and improvement tools to use. An application is presented based on our industrial problem.

Furthermore, a new scheduling problem results from the previous application: a shop with parallel flexible machines requiring secondary resources (tools and operator interventions), with set-up but without precedence constraints between operations of a job. We will study the total job tardiness criterion. Two approaches are proposed to solve this problem: by heuristic and by simulated annealing. For the heuristic approach, a new rule called ATCTRS has been developed. Its aim is to make a compromise between the tardiness of an operation and the occupation of the machine. For the meta-heuristic approach, we mainly study a neighborhood structure fitting the problem to solve.

Keywords: enterprise modeling, continuous improvement, scheduling, parallel machines, quality control