

N° d'ordre :

Rapport de Synthèse en vue d'obtenir l'Habilitation à Diriger des Recherches

présenté à
l'Université des Sciences et Technologies de Lille

par
Khaled MESGHOUNI
Docteur en Productique

Résolution et optimisation des problèmes de la chaîne logistique avec des techniques de soft computing

Soutenue le 10 décembre 2007 devant le Jury d'examen :

Rapporteurs :	J. J. LESAGE	Professeur, ENS de Cachan
	A. EL MOUDNI	Professeur, Université de Belfort-Montbéliard
	A. QUILLOT	Professeur, Université de Clermont Ferrand
Examineurs :	P. BORNE	Professeur, Ecole Centrale de Lille
	E. CRAYE	Professeur, Ecole Centrale de Lille
	D. TRENTESAUX	Professeur, Université de Valenciennes
	C. VASSEUR	Professeur, Université de Lille 1

*Habilitation à diriger des recherches, préparée dans l'équipe du
Professeur Pierre BORNE
au Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique & Signal
(LAGIS UMR CNRS 8146, Ecole Centrale de Lille)*

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués au Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique & Signal (LAGIS UMR CNRS 8146) au sein de l'équipe Ingénierie de la Décision dirigée par le Professeur Pierre BORNE. Je tiens à lui exprimer mes plus vifs remerciements et l'expression de mon amitié sincère. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude pour ses précieux conseils et son soutien dont j'ai bénéficié tout au long de notre collaboration.

Pour l'honneur et le plaisir qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail et d'en être les rapporteurs je tiens très sincèrement à remercier les professeurs Jean-Jacques LESAGE, Abdellah EL MOUDNI et Alain QUILLOT.

Je tiens également à remercier les professeurs Etienne CRAYE, Christian VASSEUR et Damien TRENTESAUX pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de participer à ce jury.

Mes remerciements vont également au professeur Besoa RABENASOLO de l'ENSAIT de Roubaix pour sa collaboration fructueuse et son amitié sincère.

Je tiens également à remercier tous mes amis et mes collègues du LAGIS et de l'Ecole Centrale de Lille, et plus particulièrement les chercheurs qui ont travaillé avec moi et sans lesquels un tel mémoire n'aurait pu voir le jour.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et toute mon affection à mon épouse Soumeya et à mes deux enfants ainsi qu'à mes parents pour leur soutien, leur patience et pour leur amour sans limite.

TABLE DES MATIERES

CURRICULUM VITAE	9
1 Informations Générales	11
2 Formation	11
3 Coursus	11
4 Résumé d'activités	12
4.1 Activités de Recherche	12
4.2 Activités Pédagogiques	13
ACTIVITES DE RECHERCHE	15
INTRODUCTION GENERALE	17
INTRODUCTION DU CRITERE FLUX DE PASSAGERS POUR LA REGULATION D'UN SYSTEME DE TRANSPORT URBAIN	21
1 Introduction	21
2 Formulation générale	22
2.1 Définitions	22
2.2 Modélisation d'un réseau de transport	23
2.2.1 Modélisation par les systèmes multi-agents	23
2.2.2 Modélisation des itinéraires	23
2.2.3 Modélisation par les réseaux de Petri (RdP)	23
2.3 Modèle proposé	23
2.3.1 Modélisation simple d'une ligne de transport	24
a) Jeton simple.....	24
b) Jeton combiné.....	25
2.3.2 Modélisation du réseau en mode normal.....	25
a) Modélisation d'une ligne par des portions de trajet	26
b) Modélisation d'une ligne en mode normal	27
c) Modélisation d'une ligne en mode perturbé	28
2.4 Formulation du problème	28
2.4.1 Description du réseau	29
2.4.2 Description de la perturbation	29
2.4.3 Description des contraintes	29
2.4.4 Description des critères	30
a) Critère de régularité.....	30
b) Critère de ponctualité	31
c) Critère de correspondance	31
3 Résolution du problème	32
3.1 Formulation des critères pour le problème réel	32
3.1.1 Expression de la charge des véhicules.....	32
3.1.2 Expression du flux de passagers attendant aux stations	33
3.1.3 Expression du nombre de passagers descendant des véhicules	33
3.1.4 Critère de régularité.....	33
3.1.5 Critère de ponctualité	34
3.1.6 Critère de correspondance	34
3.2 Méthodes de résolution	34
3.2.1 Codage proposé.....	35

3.2.2	Opérateur de croisement	36
3.2.2	Opérateur de mutation	37
3.2.4	Construction de la population initiale	38
3.2.5	Détermination de la fonction d'évaluation	38
4	Conclusion	40
	OPTIMISATION DE L'ORDONNANCEMENT EN MILIEU INCERTAIN	41
1	Introduction	41
2	Formulation du problème	41
2.1	Définition du problème	42
2.1.1	Formulation mathématique	45
2.2	Méthodes d'insertion	47
2.2.1	Insertion statique	48
a)	Insertion dans les disponibilités machines	48
b)	Elargissement de la fenêtre des périodes de disponibilité des machines	48
2.2.2	Insertion dynamique	48
a)	Création des disponibilités machines	49
b)	Ré-ordonnancement complet	49
2.3	Calcul de bornes inférieures	49
a)	Borne inférieure du makespan des demandes fermes	50
b)	Borne inférieure du makespan des demandes prévisionnelles	50
c)	Borne inférieure du coût de fabrication des demandes fermes	51
d)	Borne inférieure du coût de fabrication des demandes prévisionnelles	51
3	Conclusion	51
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	53
	BIBLIOGRAPHIE GENERALE	57
	BIBLIOGRAPHIE PERSONNELLE	67
	TRAVAUX D'ENCADREMENT	71
	Co-direction de thèses de doctorat	71
	Encadrement de DEA (Master Recherche)	73
	ACTIVITES D'INTERET COLLECTIF AUX NIVEAUX NATIONAL ET INTERNATIONAL	77
	ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT & ENCADREMENTS PEDAGOGIQUES	79
	ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT	81
	Enseignements dispensés	81
	ENCADREMENTS PEDAGOGIQUES	85

RECAPITULATIF DES NOTATIONS

- s_k^l : Station k, de la ligne l
 v_i^l : Véhicule i de la ligne l
 ET_k : Place contenant tous les véhicules qui vont entrer en station s_k^l
 SL_k : Place contenant tous les véhicules qui ne sont pas en arrêt dans la station s_k^l .
 SO_k : Place contenant tous les véhicules qui sont en arrêt dans la station s_k^l .
 T_k : Transition représentant l'entrée en station s_k^l .
 T'_k : Transition représentant la sortie de la station s_k^l .
 $succ_v$: Donne l'ordre de passage des véhicules ($succ(v_i^l) = v_{i+1}^l$)
 $succ_s$: Donne la station suivante ($succ_s(s_j^l) = s_{j+1}^l$)
 v_m^l : Véhicule m roulant sur la ligne l
 (v_i^l, s_j^l) : Couple véhicule, station représentant une couleur pour le réseau de Petri
 (v_i^l, p_j^l) : Couple véhicule, portion représentant une couleur pour le réseau de Petri
 $Proj$: Gère les portions ($proj_l(v_i^l, p_j^l) = (p_i^l)$).
 $prec$: Gère la progression du véhicule dans le sens retour ($prec(v_i^l, p_j^l) = (v_i^l, p_{j-1}^l)$)
 $d_{i,k}^l$: Date de passage du véhicule i à la station k de la ligne l
 $C_{i,k}^l$: Charge du véhicule i à la station k de la ligne l avant la régulation
 $C'_{i,k}^l$: Charge du véhicule i à la station k de la ligne l après la régulation
 $\mu_k^l(t)$: Nombre de voyageurs arrivant par unité de temps à la station s_k^l à l'instant t
 δ : Durée de perturbation
 $d_{i,k}^l$: Date perturbée de passage du véhicule i à la station k de la ligne l
 $dm_{i,k}^l$: Durée minimale de la traversée de la station s de la ligne l par le véhicule i
 $\tau_{i,\sigma(i)}^{l_1,l_2}$: Proportion de voyageurs allant de $v_i^{l_1}$ vers $v_{\sigma(i)}^{l_2}$
 $\sigma(i)$: représente un ensemble de véhicule
 $tr_{k_1,k_2}^{l_1,l_2}$: Durée minimale pour assurer une correspondance
 $\pi_{i,k}^l$: Retard maximal toléré
 A_l : Durée total d'attente des voyageurs dans les différentes stations de la ligne l
 A : Durée total d'attente des voyageurs dans la totalité du réseau
 $E(A)$: Gain sur le temps d'attente des voyageurs dans la totalité du réseau
 $r_{i,k}^l$: Retard imposé par la régulation sur le véhicule i à la station k de la ligne l
 $E(\Delta T)$: Gain sur l'augmentation des durées des trajets
 $A_{transit}$: Durée totale de transfert (transit)
 $E(\Delta A_{transit})$: Gain sur la durée des transferts
 Ch_{max} : Capacité maximale des véhicules (la même pour la totalité des véhicules)
 $na_{i,k}^l$: Nombre de passagers qui ne peuvent pas monter dans v_i^l à s_k^l avant la régulation

$na_{i,k}^l$: Nombre de passagers qui ne peuvent pas monter dans v_i^l à s_k^l après la régulation
 $nd_{i,k}^l$: Nombre de passagers qui descendent du v_i^l à s_k^l avant et après la régulation
 $na_{i,k}^l$: Nombre de passagers qui descendent du v_i^l à s_k^l après la régulation
 $I_j(EI)$: intervalle de validité de l'enfant 2 pour la station j
 f_i^k : Moyenne des solutions de la $i^{ième}$ fonction objectif à la $i^{ième}$ itération
 J : L'ensemble des ordres de fabrication fermes
 J' : L'ensemble des ordres de fabrication prévisionnels
 n : Nombre des ordres de fabrication fermes
 n' : Nombre des ordres de fabrication prévisionnels
 N : Nombre total des ordres de fabrication
 M : Nombre total de machines
 n_j : Nombre d'opérations de l'ordre j
 O_{ij} : L'opération i de l'ordre de fabrication j
 r_{ij} : La date de début au plus tôt de O_{ij}
 p_{ijm} : Durée opératoire de O_{ij} sur la machine m
 C_j : Date de fin d'exécution de l'ordre de fabrication j
 $x_{i,j,m}$: Coefficient d'affectation de l'opération O_{ij} sur la machine m, $x_{i,j,m} \in \{0,1\}$
 F_j : Coût de fabrication de l'ordre j
 MP_j : Coût de la matière première de l'ordre j
 S_j : Coût de stockage de l'ordre j
 P_j : Coût de pénalité de l'ordre j
 C : Coût total de production
 L_m : Coût de lancement de la machine m
 CS_j : Coût de stockage de l'ordre j par unité de temps
 Cp_j : Coût de pénalisation de l'ordre j par unité de temps
 C_{ijm} : Date de fin de l'opération O_{ij} sur la machine m
 $Coût_{ijm}$: Coût de fabrication de l'opération O_{ij} sur la machine m
 CM_m : Coût de production par unité de temps sur la machine m
 d_j : Date de livraison de l'ordre j
 E_j, T_j : Durée respectivement de stockage et de retard
 $Pr[d]$: Probabilité de date de livraison $d_j = d$
 V_j : Prix de vente de l'ordre j
 D_j : Ensemble de dates de livraison possibles pour l'ordre prévisionnel j
 \mathcal{R}_m : Ensemble des possibilités de dates d'insertion sur la machine m
 TP_{sm} : $S^{ème}$ temps d'insertion sur la machine m (minimum de l'ensemble \mathcal{R}_m)
 $[a, b]_m$: Intervalle de disponibilité de la machine m ($a \in \mathcal{R}_m$)
 C_{fmax*} : Borne inférieure du makespan pour les ordres fermes
 r_j : La plus petite date de disponibilité l'ordre de fabrication j
 r'_k : La plus petite date de disponibilité de la machine k
 γ_{ij} : La plus petite durée opératoire de l'opération O_{ij} ,
 C_{pmax*} : Borne inférieure pour les ordres prévisionnels
 \mathcal{R}_k : L'ensemble des possibilités de dates d'insertion sur la même machine k
 C_{ferme}^* : Coût au delà du quel la solution n'est pas viable
 β_k : Le coefficient d'utilisation de la machine k
 $C_{prévision}^*$: Borne inférieure du coût de fabrication des demandes prévisionnelles

CURRICULUM VITAE

1 Informations Générales

Nom patronymique : MESGHOUNI
Prénom : Khaled
Date et lieu de naissance : 9 mai 1968 à Constantine (Algérie)
Nationalité : Française
Etat matrimonial : Marié
Nombre d'enfants : Deux
Adresse personnelle : 10, Rue de Chemin Vert
59260 Hellemmes, Lille
Adresse professionnelle : Ecole Centrale de Lille
Cité Scientifique - BP 48
59651 Villeneuve d'Ascq Cedex
Téléphone professionnel : +33 3 20 33 54 85
Fax professionnel : +33 3 20 33 54 18
E-Mail : khaled.mesghouni@ec-lille.fr

2 Formation

Juin 1993 : Université de Constantine (Algérie)
Ingénieur d'état
Juin 1995 : Ecole Centrale de Lyon
DEA de Génie Electrique
Janvier 1999 : Université des Sciences et Technologies de Lille
Doctorat de Productique

3 Cursus

1993/1994 : Vacataire
Université de Constantine (Algérie)
1995/1998 : Vacataire
Ecole Centrale de Lille
1998/1999 : Nommé sur un poste de P.R.A.G.
Ecole Centrale de Lille

Depuis 1999 :

Maître de Conférences en 61^{ème} section

Ecole Centrale de Lille

Thèse de Doctorat

“Application des Algorithmes Evolutionnistes dans les problèmes d’optimisation en ordonnancement de la production”

Soutenue le 5 Janvier 1999 devant le jury d’examen composé de :

Président	J.G. GENTINA	Prof. Ecole Centrale de Lille)
Rapporteurs	C. TAHON M.G. SINGH	Prof. Université de Valenciennes Prof. UMIST, Manchester, Royaume-Uni
Examineurs	R. SOENEN S. MAOUCHE S. HAYAT	Prof. Université de Valenciennes Prof. Université de Lille I Dr. HDR, INRETS-ESTAS
Directeur de thèse	P. BORNE	Prof. Ecole Centrale de Lille
Co-directeur	S. HAMMADI	Dr. Ecole Centrale de Lille.

4 Résumé d’activités

4.1 Activités de Recherche

Thèmes de Recherche :

- Résolution et optimisation des problèmes liés au management des chaînes logistiques, et notamment dans la partie qui concerne l'organisation, la planification et la gestion de la production par des techniques de soft-computing
- Modélisation et résolution des problèmes liés à la régulation des transports urbains.

Encadrement de travaux de recherche :

- 3 thèses : 1 soutenue en 2004, 1 en 2005, 1 prévue pour 2009.
- 4 DEAs : 1 en 1999, 2 en 2002, 1 en 2003.

Liste des travaux et publications :

- 6 articles dans des revues scientifiques internationales.
- 20 communications dans des congrès internationaux et nationaux avec comités de lecture et actes.
- 2 rapports de fin de contrat.

Responsabilités :

- Membre élu à la Commission des Spécialistes de l’Ecole Centrale de Lille.
- Membre élu du Conseil Scientifique de l’Ecole Centrale de Lille.
- Membre du Conseil du LAGIS.
- Membre IEEE.
- Vice-président du “PhD Student Activities Committee” de IEEE SMC.
- Lecteur dans plusieurs revues : IEEE-SMC, EJOR

Collaborations Scientifiques :

- Animation d'une collaboration avec l'INRETS
- Co-animation de l'axe III du projet MOST.

Activités Internationales :

- Secrétaire d'un Symposium du congrès WAC'2006
- Membre du comité d'organisation des congrès CESA'98, CIFA'00, IEEE/SMC'02.
- Membre du comité d'organisation de workshops en 2006 et 2007.

4.2 Activités Pédagogiques**Activités d'enseignement :**

- Cours de 1^{ère}, 2^{ème} années de Centrale de Lille en Informatique, Mathématiques appliquées, Micro-informatique.
- Cours de 1^{ère}, 2^{ème} et 4^{ème} années de l'IG2I en Recherche opérationnelle et Chaînes logistiques
- Cours de 2^{ème} année de l'EDHEC en Systèmes d'information et Gestion de projet.

Responsabilités pédagogiques :

- Responsable de plusieurs cours (Probabilités, Statistiques Industrielles et Recherche Opérationnelle)
- Directeur Scientifique de 11 projets réalisés dans le cadre de l'activité projet sur 2 ans d'EC Lille
- Tuteur de nombreux stages d'élèves ingénieurs de l'Ecole Centrale de Lille et de l'IG2I.

ACTIVITES DE RECHERCHE

INTRODUCTION GENERALE

J'ai intégré l'équipe **Ingénierie de la Décision (ID)** anciennement Analyse et Commande (AC) en 1995 afin de préparer une thèse de doctorat. Cette équipe est animée par le professeur Pierre BORNE et appartient au **Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique & Signal (LAGIS UMR CNRS 8146)**. Les activités de l'équipe "Ingénierie de la Décision" s'articulent autour de quatre thèmes liées par l'utilisation des nouvelles techniques basées sur le soft computing pour la modélisation, le pilotage, l'optimisation et l'aide à la décision pour des systèmes industriels complexes évoluant dans des environnements incertains :

- Fusion d'Informations,
- Apprentissage Dynamique et Décision,
- Modélisation et Commande des Systèmes Complexes,
- Conduite et Optimisation en Environnement Incertain.

C'est dans ce dernier axe que s'inscrivent mes activités de recherche. En effet, je m'intéresse aux problèmes d'ordonnement de la production dans les systèmes flexibles manufacturiers en environnement incertain. Les problèmes considérés dans ce contexte correspondent au cas où les informations concernant la production et la demande sont mal définies ou inconnues. C'est le cas par exemple pour certaines industries où on ne connaît pas à l'avance les quantités ni les produits à fabriquer car elles dépendent d'un certain nombre de paramètres aléatoires ou incontrôlables comme par exemple :

- Les moyens mis à disposition pour la production (pannes de machines, absentéisme),
- Les durées des opérations et des tâches,
- Le nombre des ordres de fabrication et des opérations

L'obtention d'un ordonnancement réalisable et si possible optimal au sens d'un ou plusieurs critères significatifs est d'une importance capitale pour les entreprises qui sont sans cesse confrontées à des impératifs de productivité, de flexibilité et de réactivité. Les études théoriques existantes ont montré qu'il est toujours difficile de résoudre de tels problèmes sans avoir recours à des hypothèses simplificatrices comme par exemple ne considérer qu'un seul critère lors de la résolution ou encore supposer certains paramètres déterministes comme par exemple ; la durée opératoire ou le nombre d'opérations.

La résolution des problèmes d'optimisation et d'ordonnement occupe au sein du LAGIS une place prépondérante car ce thème est présent dans deux équipes de recherche qui sont **Ingénierie de la Décision (ID)** équipe dirigée par le Professeur Pierre BORNE cité précédemment et l'équipe **Systèmes à événements discrets (SED)** dirigée par le Professeur Etienne CRAYE qui s'intéresse entre autres aux problèmes d'ordonnement cyclique en utilisant principalement des outils tels que les réseaux de Petri. Dans l'équipe **ID** on s'intéresse plutôt à l'ordonnement et à l'optimisation des problèmes du type job-shop flexible. Les premiers travaux de l'équipe sur cette thématique remontent à 1991 avec la thèse de Slim Hammadi [HAM 91]¹ Ce travail consistait à proposer une méthode d'ordonnement optimisant les temps d'attente et de transit dans les systèmes de production flexibles de type job shop avec contraintes de ressources. Ces travaux ont permis de mettre le doigt sur la problématique de l'optimisation dans le domaine de l'ordonnement du fait que

¹ Le repère [ABC xx] renvoie à la Bibliographie Générale.

nous avons souvent affaire à des problèmes très complexes en raison de leurs fortes dimensions combinatoires. Deux approches peuvent alors être utilisées :

- les méthodes exactes (programmation linéaire, optimisation par séparation et évaluation progressive "branch and bound"),
- les méthodes heuristiques visant à générer, à l'aide de règles locales de décision (ou règles de priorité) des ordonnancements réalisables et présumés satisfaisants vis-à-vis d'un ou plusieurs critères.

En effet, compte tenu des difficultés rencontrées par les méthodes exactes à résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire (problèmes connus par leur appartenance à la classe des problèmes NP-difficiles), les méthodes heuristiques ont été préférées car elles constituent quasiment l'unique moyen d'aboutir à une bonne solution en un temps raisonnable. C'est dans ce contexte et suite à un appel d'offre régional "contrat d'objectif", du "GRAISyHM" (Groupement de Recherche en Automatisation Intégrée et Système Homme-Machine) que fut proposé le projet 4 intitulé "Méthodes de planification, optimisation et ordonnancement des systèmes complexes et incertains" intégrant plusieurs laboratoires de la région dont le notre. L'objectif du projet 4 était d'apporter des réponses méthodologiques et opérationnelles à certaines questions (augmenter la productivité, réduire les cycles de fabrication, tenir les délais,...). Le système envisagé est caractérisé par :

- la coopération de nouvelles méthodes de résolution utilisées pour résoudre des problèmes d'optimisation et d'apprentissage : les algorithmes génétiques (AGs), les réseaux de neurones, la programmation par contraintes,...
- l'utilisation de plusieurs modèles pour la description des connaissances, permettant de prendre en compte les connaissances beaucoup moins formelles de l'ingénieur : la logique floue, l'approche multicritères, les systèmes à base de connaissance.

Partant de ces deux points, deux grands chantiers de recherche ont été lancés. Le premier concernait la mise au point d'une méthodologie basée essentiellement sur un modèle d'ordonnancement flou permettant l'intégration d'un ensemble de connaissances d'ordre théorique et pratique et souvent de natures hétérogènes[LIO 98]. Le deuxième me concernait plus particulièrement. J'ai été amené à mettre au point de nouvelles méthodes et techniques basées sur l'utilisation de métaheuristiques pour la résolution et l'optimisation des problèmes d'ordonnancement. Je me suis intéressé tout particulièrement aux problèmes de type job shop flexible. J'ai utilisé pour cela des techniques de soft-computing et plus particulièrement les algorithmes génétiques pour aboutir à des solutions proches de l'optimum. En effet, l'utilisation de ces algorithmes s'est vite imposée. Sachant que notre objectif était de proposer des solutions d'aide à la décision, les algorithmes génétiques du fait de leur parallélisme offraient la possibilité d'avoir plusieurs choix. Les résultats obtenus étaient des ordonnancements réalisables optimisant le critère retenu à savoir la minimisation de la durée totale de l'ordonnancement c'est-à-dire le makespan [YAM 92] [GHE 94] [MES 99]. Parallèlement à cette thématique, je me suis intéressé également à l'optimisation des systèmes de transport urbain. En effet, durant plusieurs mois, j'ai travaillé dans le cadre du GRRT (Groupement Régional Nord-Pas de Calais de Recherche pour les Transports) et en collaboration avec l'INRETS (Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité), ce travail consistait à faire une étude de faisabilité permettant la mise en place de deux boucles de service permettant de desservir toute ou partie des stations de métro de Lille,

après l'allongement de ligne 2 [CA/98/8]². Ce fut là mes premières recherches dans le domaine du transport urbain. Ces travaux se sont poursuivis dans le cadre d'un projet prospectif sous l'égide du GRRT, où j'ai co-encadré mon premier DEA dont le sujet était "Application des algorithmes génétiques à la régulation du trafic de bus". Ces travaux ont eu le mérite de nous montrer les difficultés auxquelles sont confrontés les régulateurs du trafic urbain, en l'occurrence, la nécessité pour eux d'anticiper les perturbations et de visualiser l'impact de leurs décisions de régulation. Ceci n'était possible que si nous avions un modèle fiable du réseau, ainsi que des outils efficaces d'aide à la décision. Suite à ces remarques et dans le cadre du projet de recherche coopérative toujours sous l'égide du GRRT, j'ai travaillé en collaboration avec Monsieur Emmanuel CASTELAIN afin de proposer un modèle pour les réseaux de transport urbain. Au vue des premiers résultats obtenus, nous avons proposé un sujet de thèse, soutenue en 2004, que j'ai co-encadrée dont le sujet était "Contribution à la résolution des problèmes de régulation dans les systèmes de transport dans un contexte multicritère par approche évolutionniste". J'ai également et dans le cadre du projet MOST (Méthodologies pour l'Optimisation dans les Systèmes de Transports et Télécommunications) co-animé au côté du professeur Besoa RABENASOLO l'axe III "Optimisation stochastique pour la supply chain", thématique que j'ai trouvée très prometteuse, en effet, la prise en compte de données incertaines permet de se rapprocher de la réalité industrielle. Ces données sont régies par des lois aléatoires (probabilistes) et rendent le problème plus complexe sachant que, souvent ces derniers sont NP-Complets. C'est dans ce cadre que j'ai co-encadré la thèse de Monsieur Djamel BERKOUNE soutenue en 2005.

La présentation de mes principaux travaux de recherche est répartie en deux chapitres qui se présentent de la façon suivante :

Le premier chapitre présente l'étude que j'ai menée dans le domaine du transport concernant l'amélioration de la qualité des déplacements des usagers dans la chaîne multimodale des transports urbains dans le cadre du projet coopératif, en proposant une modélisation basée sur les réseaux de Petri, ainsi qu'un système d'aide à la décision capable de faire face aux différentes perturbations affectant le réseau. Ce travail était destiné au futur réseau de transport urbain de la société SEMURVAL, exploitant du système de transport de la ville de Valenciennes.

Le deuxième chapitre marque un peu mon retour à la source, il expose le travail effectué dans le cadre du projet MOST, ce chapitre présente une étude sur les problèmes d'ordonnancement stochastique et propose pour leur résolution des méthodes basées sur des métaheuristiques.

En conclusion de cette partie, je donne les perspectives de mes travaux de recherche en cours et à venir, la liste de mes publications personnelles, le bilan de mes travaux d'encadrement et mon implication dans les activités d'animation scientifique nationales et internationales.

² Le repère [CA/xx/yy] renvoie à la liste des Congrès Internationaux dans la Bibliographie personnelle .Le repère [RI/xx/y] renvoie à la liste des Revues dans la Bibliographie personnelle

INTRODUCTION DU CRITERE FLUX DE PASSAGERS POUR LA REGULATION D'UN SYSTEME DE TRANSPORT URBAIN

1 Introduction

L'origine de ces travaux remonte à 1999 dans le cadre du projet prospectif cité plus haut. Le but était de proposer de nouveaux outils basés essentiellement sur les techniques du soft-computing pour la régulation du trafic de bus. Les réseaux de transport urbain sont des processus complexes, les exploitants se doivent de garantir la qualité des services proposés aux voyageurs en respectant les horaires théoriques annoncés dans le processus de planification. Malheureusement, il est parfois impossible de respecter cette contrainte. En effet, les perturbations qui agissent sur ce type de réseaux sont nombreuses et interviennent de façon aléatoire et cumulée, par conséquent les effets sur le réseau deviennent imprévisibles. La qualité de service définie par l'exploitant du système de transport impose alors d'effectuer une régulation en temps réel ce qui dans la plupart des cas reste très difficile à réaliser.

Compte tenu des compétences que j'avais acquises dans le domaine de l'optimisation, j'ai été invité à collaborer à ce projet. Nous avons alors opté pour l'utilisation des algorithmes génétiques, méthode que j'ai utilisée avec succès pour la résolution et l'optimisation des problèmes d'ordonnancement [MES, 99] ainsi que pour l'optimisation de la commande pour les moteurs asynchrones [MES 95]. Les résultats obtenus ont été très encourageants, mais néanmoins, nous avons constaté qu'il était plus judicieux d'étendre cette régulation à tout le système de transport incluant par conséquent les autres modes comme le métro et le tramway. Il s'est posé alors le problème d'homogénéité du système, on passe d'un système mono support à un système multi support : allant du bus qui évolue dans un milieu partagé avec d'autres moyens de transport tels que la voiture et subissant des inconvénients de circulation et autres travaux. Le métro qui évolue dans un milieu propre, et le tramway qui évolue dans un milieu mixte (route et rails propres). La mise en place d'une modélisation du réseau multimodal est devenue une nécessité. Vint alors le projet coopératif soutenu par le GRRT, un premier travail a été réalisé dans ce cadre proposant un modèle basé sur les réseaux de Petri colorés de haut niveau [CA/02/9]. Ce premier modèle nous a permis de mesurer l'impact des décisions de régulation sur le flux de passagers. Nous avons ensuite et dans le cadre de la thèse de Mahjoub DRIDI, apporté des améliorations notables à ce modèle. Ce travail concernait le réseau de transport de Valenciennes. En effet, la mise en place de deux lignes de tramway a contraint l'exploitant à réorganiser complètement le trafic. Dans cette nouvelle organisation de nombreux pôles d'échanges ont été créés dont certains accueillent plus de deux modes de transport : Bus, Tramway et TER.

L'objectif était de concevoir un système d'aide à la décision (S.A.D) capable de surveiller le fonctionnement global du trafic en anticipant les différentes perturbations qui peuvent altérer son fonctionnement, et en fournissant des propositions de décisions pertinentes afin de rétablir le service nominal. Ce système s'appuie sur une approche par réseaux de Petri pour la partie modélisation et les algorithmes évolutionnistes (génétiques) pour la partie régulation.

2 Formulation générale

2.1 Définitions

Face à l'élargissement des zones urbaines et aux besoins croissants de déplacement des personnes entre les différentes agglomérations, les systèmes de transport urbains sont devenus de plus en plus utilisés dans la vie quotidienne des usagers. Afin de répondre au mieux à la demande de transport, plusieurs systèmes ont été mis en place. Ces systèmes varient selon les lieux géographiques et les coûts d'exploitation des infrastructures qui leur sont dédiées. Les systèmes de transport peuvent être classés en deux catégories principales :

Le système de transport non guidé : Il s'agit principalement des bus. Il offre plusieurs avantages tels que la souplesse dans le choix des itinéraires et un coût d'exploitation et d'infrastructure assez faible. Par contre, il est handicapé par plusieurs inconvénients rendant son exploitation peu fiable vis à vis de certains critères de régulation. En effet, ce système a une réaction relativement lente face à une perturbation qui peut l'affecter et souffre également d'une forte dépendance par rapport aux conditions de circulation

Le système de transport guidé : C'est un système qui utilise tout ou partie d'un site propre, tel que le tramway et le métro. Le tramway dépend plus ou moins de la circulation puisqu'il emprunte également des voies routières. Par contre, le métro nécessite une importante infrastructure et donc un coût de construction plus élevé.

La plupart des systèmes de transport nécessitent un outil de régulation performant combinant les deux catégories citées plus haut. Ces réseaux sont dit multimodaux et sont caractérisés par la présence de bus, de tramways, de métros et également du train.

L'exploitation d'un réseau de transport nécessite préalablement la mise au point d'un programme de production, c'est-à-dire, une planification de la gestion théorique représentée par un tableau de marche de base définissant les modalités du fonctionnement optimal du réseau pour des conditions moyennes d'exploitation. Cette optimisation est bien évidemment réalisée en temps anticipé (off ligne). Le non respect des horaires prévus cause une augmentation des temps d'attente des passagers dans les différentes stations, il entraîne aussi une mauvaise répartition de la charge entre les véhicules, ce qui crée chez les voyageurs une sensation d'inconfort. Tous ces éléments doivent être pris en compte lors de la seconde phase de l'exploitation qui consiste à adapter le programme de production aux conditions réelles d'exploitation. Cette étape, se déroule en temps réel et a pour but de ramener le système à son point d'équilibre c'est-à-dire respectant son tableau de marche et par conséquent satisfaisant différents objectifs tels que la ponctualité, la régularité et les correspondances.

Afin de garantir une bonne harmonisation des décisions de régulation sur le réseau de transport, il est indispensable d'avoir un système de gestion centralisé dit Système d'Aide à l'Exploitation (SAE). L'obtention de ce dernier est devenue possible grâce à l'évolution des moyens de communication et de traitement. Le SAE permet une gestion planifiée et contrôlée de l'exploitation ; Il permet en temps réel le suivi du fonctionnement global du réseau ainsi que la localisation des perturbations, permettant ainsi, aux régulateurs d'intervenir si nécessaire pour rétablir la situation de fonctionnement théorique. La nécessité de mettre en place un modèle permettant de reproduire le plus fidèlement possible le comportement du système réel est primordial car il permet de tester et de valider les décisions prises par le régulateur.

2.2 Modélisation d'un réseau de transport

La modélisation reste un moyen très efficace pour représenter la réalité, elle permet de commander, d'analyser et éventuellement d'améliorer les performances des systèmes. En effet, cet outil s'est vite imposé et est devenu indispensable dans toutes les disciplines ; automatique, mécanique, économie, etc. Le domaine du transport urbain de part sa nature pluridisciplinaire n'a pas échappé à la règle. La satisfaction de notre objectif à savoir, proposer un service de transport urbain respectant les contraintes de fonctionnement citées précédemment (respect des horaires théoriques, garantie des correspondances, réduction des temps d'attente etc.) a conduit naturellement les chercheurs à s'intéresser à ce problème et à proposer des modèles, nous pouvons citer :

2.2.1 Modélisation par les systèmes multi-agents

Un système multi-agents (SMA) est un ensemble d'agents situés dans un certain environnement coopérant entre eux afin de résoudre un problème impossible à résoudre par chacun des agents seul. Les agents sont des entités caractérisées par le fait qu'elles sont, au moins partiellement, autonomes et peuvent être de natures hétérogènes [FER 95] [GRE 97] [SYC 98]. Les SMA sont apparus dans les années 90, et ont été utilisés dans le domaine de l'intelligence artificielle ou ils permettent de réduire la complexité de la résolution d'un problème en divisant le savoir nécessaire en sous-ensembles. Leur utilisation a été étendue à d'autres domaines comme la modélisation des problèmes de transport d'une façon générale allant du contrôle de trafic aérien pour la ville de Sydney [LJU 92] au transport urbain [BOM 92] [BAL 00] [SOU 00] [HER 01] [LAI 02] [FAY 03].

2.2.2 Modélisation des itinéraires

Cette méthode est basée sur la théorie des graphes ; un nœud représente un arrêt et le parcours correspond à un arc valué représentant la distance. Cette modélisation permet de représenter les différents itinéraires possibles que les véhicules d'un réseau de transport peuvent emprunter [MUR 98] [NGA 00] [RC/01/3].

2.2.3 Modélisation par les réseaux de Petri (RdP)

Les réseaux de Petri constituent un outil de modélisation graphique et mathématique très puissant applicable à des systèmes de natures très variées comme : les systèmes de production [SIL 89] [ZHO 89], les réseaux informatiques [BAS 02], les systèmes de trafic [TOL 01] [NAI 02] [DI F 04] [DIT 06], la gestion des feux de circulation [LI 05] [TOL 05], etc. Les RdP permettent d'exprimer et de visualiser l'occurrence d'événements, la mise en parallèle, la synchronisation, le partage de ressources, le non déterminisme, etc. Ils permettent une simulation directe du système. L'utilisation des RdP dans différents domaines a contribué à leur évolution, on parle alors des réseaux temporisés, colorés, Prédicat-Transition (objets) [ALL 89] [MUR 89] [SIB 93] [SIB 94].

2.3 Modèle proposé

Le but de la modélisation d'un réseau de transport urbain est de pouvoir étudier le comportement du réseau par rapport aux différentes consignes de régulation qui seront

appliquées afin d'absorber les différentes perturbations qui auront fait dévier le système (le réseau de transport urbain) de son fonctionnement nominal. Cette modélisation doit permettre l'observation de l'évolution du trafic en fonction du flux de passagers présent dans les nombreux points du réseau (les stations, les véhicules, les nœuds de correspondance ...). Ce faisant, le modèle devrait allier précision et simplicité. Partant de ce constat, j'ai contribué à mettre au point un modèle générique d'une ligne de transport en commun au moyen des réseaux de Petri prédicat-transition T-temporisé [CA/02/9]. Ce modèle devait être complété et généralisé aux autres modes de transport, ce qui fut le travail de Mahjoub DRIDI dans sa thèse [DRI 04]. Le détail de cette modélisation sera présenté dans les paragraphes suivants.

2.3.1 Modélisation simple d'une ligne de transport

a) Jeton simple

Dans ce cas, La coloration est faite par rapport aux véhicules, l'ensemble des couleurs associées aux transitions est $\{v_1^l, v_2^l, \dots, v_m^l\}$, ou l indique le nombre de lignes dans le modèle et m le nombre de véhicules. Cette modélisation est schématisée comme suit (on ne considère que deux véhicules pour des raisons de taille) :

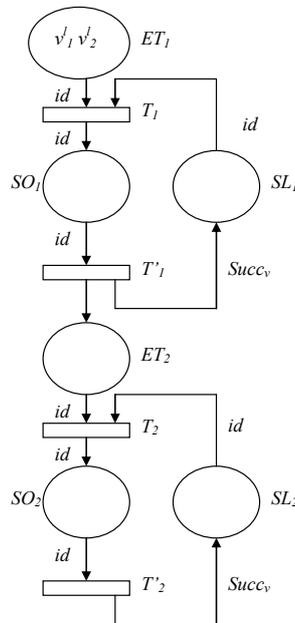


Figure 1 : Modélisation d'une ligne de transport par des jetons simples

Avec :

ET_k : Place contenant tous les véhicules qui vont entrer en station s_k^l

SL_k : Place contenant tous les véhicules qui ne sont pas en arrêt dans la station s_k^l .

SO_k : Place contenant tous les véhicules qui sont en arrêt dans la station s_k^l .

T_k : Transition représentant l'entrée en station s_k^l .

T'_k : Transition représentant la sortie de la station s_k^l .

$succ_v$: donne l'ordre de passage des véhicules ($succ(v_i^l) = v_{i+1}^l$).

Le marquage initial représente le début du service, le franchissement de la transition T_1 suppose l'existence d'un jeton (véhicule) de même couleur dans les places ET_1 et SL_1 , on

obtient à l'issue de cette action un jeton v_1^l dans la station SO_1 . Le franchissement de la transition T_1 devient possible, ce dernier dépose un jeton de couleur $succ(v_1^l) = v_2^l$ dans la place SL_1 et une marque v_1^l dans la place ET_2 . Ainsi deux transitions seront validées, T_1 pour le jeton v_2^l (le véhicule v_2^l va entrer en station s_1^l) et T_2 pour le jeton v_1^l (le véhicule v_1^l arrive à la station s_2^l).

b) Jeton combiné

Dans le modèle précédent, le passage d'un véhicule d'une station à l'autre se fait en franchissant la transition T'_k avec un arc *id* (identité) alors que le passage des différents véhicules dans une station se fait en franchissant la même transition (T'_k) mais avec un arc $succ(v_k^l)$ ce mécanisme a pour effet d'alourdir le modèle, le modèle à jeton combiné permettra de réduire le modèle, en donnant une couleur aux stations également. Le jeton coloré est de la forme (v_i^l, s_j^l) qui lie un véhicule v_i^l à une station s_j^l . Ce modèle est schématisé comme suit :

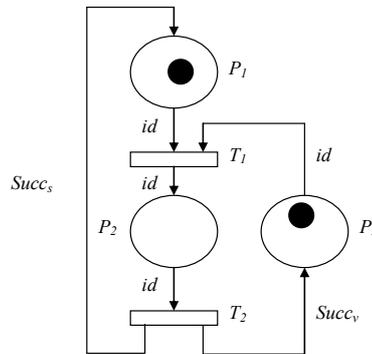


Figure 2 : Modélisation améliorée d'une ligne de transport

Un jeton de couleur (v_i^l, s_j^l) dans la place P_1 signifie qu'à l'entrée de la station s_j^l il y'a un véhicule v_i^l , cette même marque dans la place P_3 signifie que la station s_j^l est en attente du véhicule v_i^l . La fonction $succ_v$ engendrera le véhicule suivant ($succ_v(v_1^l, s_j^l) = (v_{i+1}^l, s_j^l)$) et la fonction $succ_s$ conduira à la station suivante ($succ_s(v_1^l, s_j^l) = (v_i^l, s_{j+1}^l)$)

2.3.2 Modélisation du réseau en mode normal

Le modèle que nous avons voulu mettre au point devait être capable d'aider le régulateur à mettre en place une stratégie de régulation et de mesurer l'impact de ses décisions sur le trafic en cas de perturbation. Il serait ainsi possible à travers ce modèle, de tenir compte de l'affluence des passagers aux différents points de la ligne et de matérialiser l'interaction qui existe entre les caractéristiques du trafic et la densité des flux de passagers en attente dans les stations ou dans les véhicules de transport. Pour cela, il est primordial de pouvoir localiser les différents véhicules sur le réseau. Nous avons choisi de découper chaque ligne en un ensemble de portions séparant les stations. Nous distinguons alors deux types de portions, des portions simples et des portions stations. Toutes les portions sont équipées de capteurs permettant la localisation de chaque véhicule qui passe par ces différentes stations selon des

horaires fixés. Cette représentation a l'avantage de détecter très rapidement la perturbation et d'engager par conséquent la procédure de régulation en inter-station et de réduire l'effet de cette perturbation sur l'ensemble du trafic.

a) Modélisation d'une ligne par des portions de trajet

Nous introduisons une couleur supplémentaire liée aux portions, elle est représentée par l'ensemble $P = \{p_1^l, p_2^l, \dots, p_n^l\}$. Sachant que nous avons déjà l'ensemble des couleurs associées aux véhicules représenté par $V = \{v_1^l, v_2^l, \dots, v_m^l\}$. Dans le précédent modèle nous avons introduit la fonction "succ" qui gère la progression des véhicules et des stations, nous introduisons dans cette partie, la fonction "proj" qui gère les portions ($proj_i(v_i^l, p_j^l) = (p_i^l)$). Un jeton de couleur (v_i^l, p_j^l) dans une place signifie que dans la portion p_j^l il y a un véhicule v_i^l , cette modélisation est représentée comme suit :

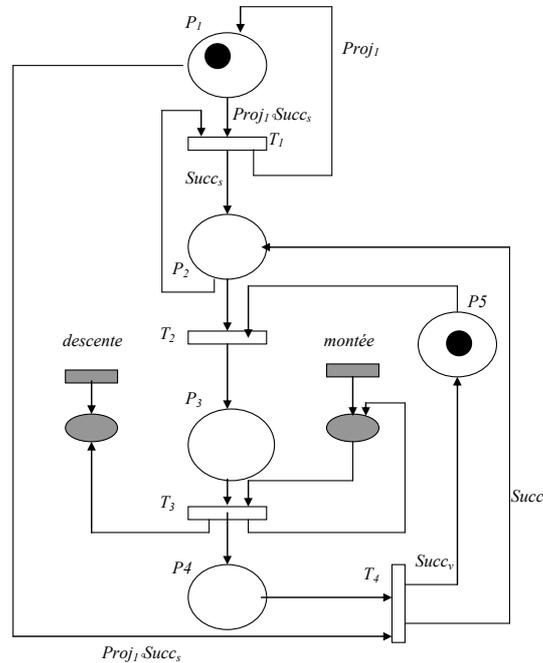


Figure 3 : Modélisation d'une ligne de transport

L'ensemble des couleurs associées aux transitions T_2 , T_3 et T_4 est $\{(v_i^l, p_{s1}^l), (v_i^l, p_{s2}^l), (v_i^l, p_{sk}^l)\}$ avec $S = \{p_{s1}^l, p_{s2}^l, \dots, p_{sk}^l\}$ représentent l'ensemble des portions de type stations. Ces couleurs permettent le franchissement des transitions et donc l'entrée des véhicules en stations, l'ensemble des couleurs associées à la transition T_1 est $Vx[\{(p_1^l, p_2^l, p_n^l) - S]$. La transition T_1 du système est franchissable par rapport à la couleur (v_i^l, p_j^l) si la place P_1 contient la marque $proj_i(v_i^l, p_j^l) = (p_j^l)$ c'est-à-dire s'il n'y a aucun véhicule sur la portion p_j^l . Le franchissement de T_1 dépose une marque de couleur (v_i^l, p_j^l) dans la place P_2 et retire une marque (p_j^l) de la place P_1 , le déplacement du véhicule v_i^l d'une portion à une autre va être décrit par le franchissement de T_1 , le franchissement de cette transition ne sera plus possible quand le véhicule v_i^l arrive à une portion station. La transition T_2 est franchissable à cet instant par rapport à un jeton de couleur (v_j^l, p_{sj}^l) sous réserve que la place P_5 contienne un

jeton de même couleur. Le véhicule est maintenant dans la station. Des voyageurs vont monter (la transition *montée*) et d'autres vont descendre (la transition *descente*) et on retrouve le jeton (v_i^l, p_{sj}^l) dans la place P_4 , contenant la nouvelle charge du véhicule v_i^l . Le franchissement de la transition T_4 représente la sortie du dit véhicule, une marque de couleur (v_i^l, p_{sj}^l) est retirée de la place P_4 et un jeton $proj_1 \circ succ_2(v_i^l, p_{sj}^l) = (p_{sj+1}^l)$ est retiré également de P_4 , un jeton de couleur $succ_s(v_i^l, p_{sj}^l) = (v_i^l, p_{sj+1}^l)$ est déposé dans P_2 et une marque de couleur $succ_v(v_i^l, p_{sj}^l) = (v_{i+1}^l, p_{sj}^l)$ est déposée dans P_5 .

b) Modélisation d'une ligne en mode normal

Le modèle que nous proposons devait être capable de représenter le fonctionnement du réseau dans les deux sens de circulation. En effet, nous considérons que le réseau est symétrique dans la mesure où son fonctionnement dans un sens est sensiblement identique dans l'autre à quelques exceptions près (comme par exemple le nombre de stations pour le réseau du bus qui peut varier). Nous complétons le modèle précédent par son symétrique sans oublier la partie qui permet de basculer du sens aller vers le sens retour. Cette partie est représentée principalement par les transitions T_5 et T_7 et les places P_6 et P_7 .

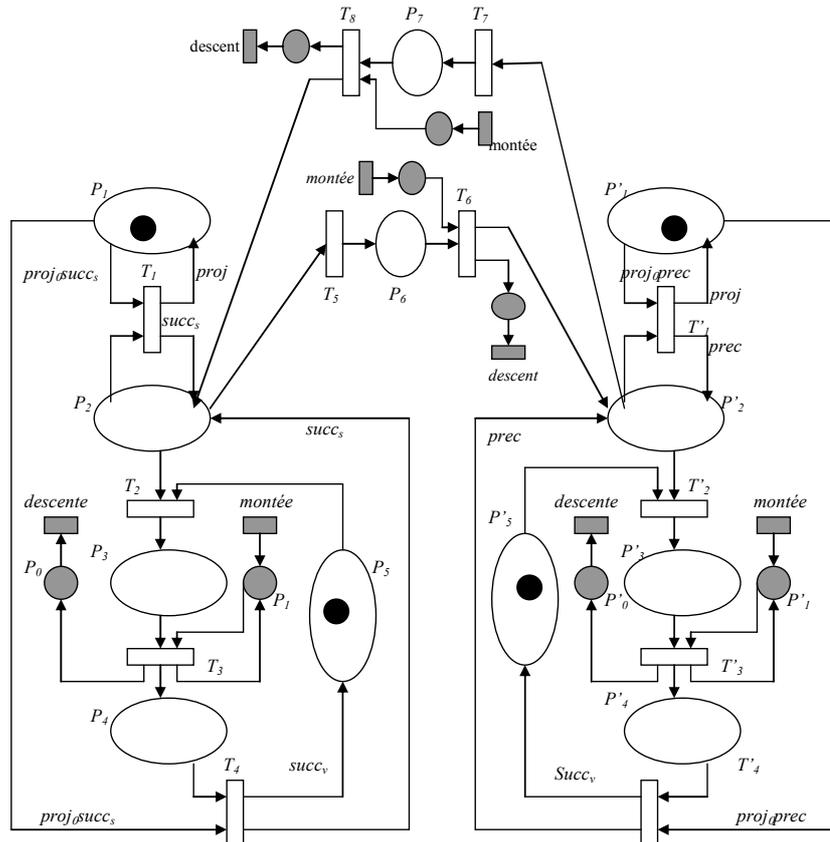


Figure 4 : Modélisation du réseau de transport en mode normal

Le principe de fonctionnement est le suivant : L'arrivée du véhicule v_i^l au terminus se fera par le franchissement de la transition T_5 par rapport à la couleur (v_i^l, p_n^l) (l'indice représente la dernière station). L'ensemble des voyageurs va descendre, et ceux qui prendront l'autre direction vont monter, une marque de couleur (v_i^l, p_n^l) sera déposée dans la place P'_2 . La progression du véhicule dans le sens retour est alors autorisée par le franchissement de la

transition T'_j . La fonction *prec* permet de gérer la progression du véhicule dans le sens retour, est telle que $prec(v_i^l, p_j^l) = (v_i^l, p_{j-1}^l)$. Le reste du réseau fonctionne exactement de la même manière que dans le sens aller. Le retour à la station de départ (sens aller) sera réalisé par le franchissement de la transition T_7 par rapport à la couleur (v_i^l, p_0^l) .

c) Modélisation d'une ligne en mode perturbé

Le but de notre modélisation est de visualiser l'impact des perturbations éventuelles sur le fonctionnement du réseau et de voir également les effets des actions de la régulation sur ce dernier. Le modèle présenté ci-dessous permet de modéliser le processus de régulation des véhicules affectés par la perturbation [RI/05/4].

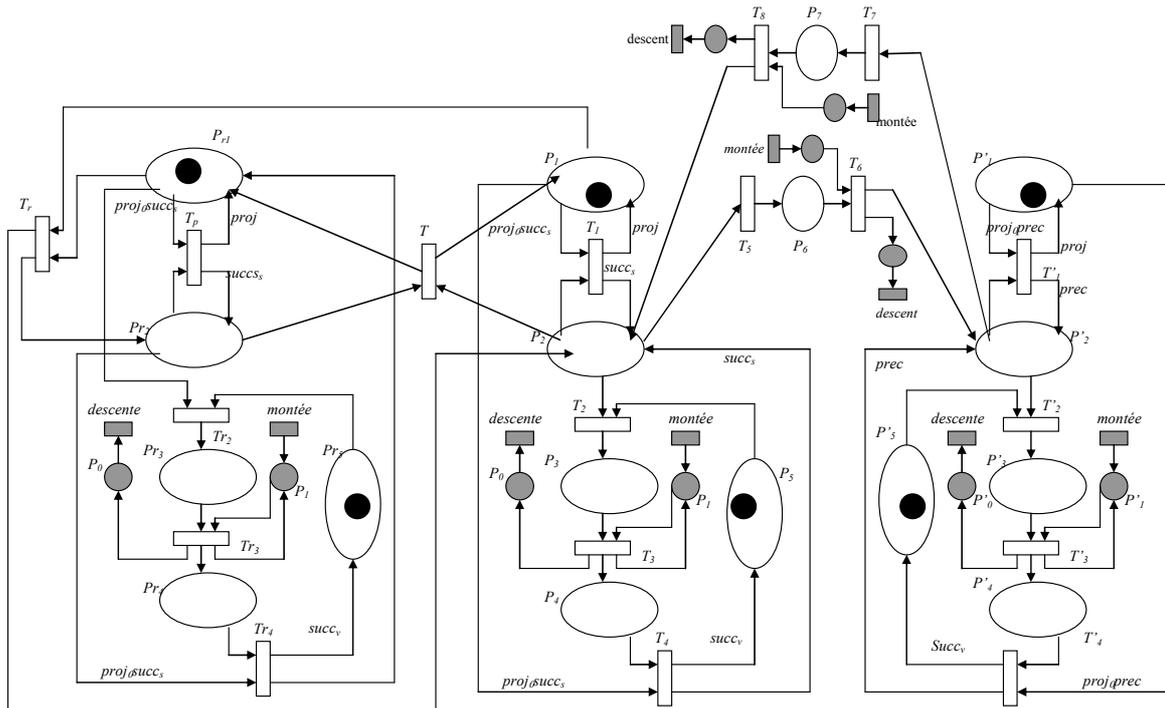


Figure 5 : Modélisation de la régulation d'une ligne de transport

Le principe consiste à isoler les tronçons affectés par une perturbation. Lors d'une perturbation, la date théorique d'entrée d'un véhicule dans un tronçon n'est plus égale à la date réelle, dans ce cas, la transition T_l du fonctionnement normal n'est plus franchissable, c'est la transition T du mode dégradé qui est valide et elle sera franchie, ainsi, les véhicules perturbés évolueront dans la partie gauche du modèle, en franchissant la transition T_p . Le retour en mode normal se fera avec la même condition (date théorique égale à la date réelle) et il est schématisé par le franchissement de la transition T_r . Le réseau de Petri ainsi construit est un réseau de Petri objet dont les jetons sont des instances de classes d'objets véhicule-portion. La classe véhicule-portion possède les attributs suivants : charge, date théorique, date réelle, numéro véhicule, numéro portion et numéro ligne.

2.4 Formulation du problème

Tout réseau de transport est soumis à des perturbations (internes ou externes) pouvant l'affecter d'une manière sérieuse en perturbant son fonctionnement. Généralement, le

dysfonctionnement altère d'une manière plus ou moins grave la qualité de service rendu aux usagers. Notre but est de proposer une régulation minimisant les effets de ces perturbations sur la qualité de service pour l'ensemble des voyageurs se trouvant dans le réseau au moment de la perturbation. La qualité du service est traduite par la régularité des passages et le respect des horaires d'arrivée des véhicules aux stations. Elle peut se résumer à une agrégation de plusieurs critères [RI/05/4] comme, la minimisation des attentes des voyageurs occasionnées par la perturbation, l'augmentation de la durée totale des trajets à bord des véhicules et la durée totale de transfert dans les nœuds de correspondance. Afin de formuler le problème, nous devons décrire les données du système en mode normal, les données concernant les perturbations ainsi que les différentes contraintes auxquelles est soumis le système.

2.4.1 Description du réseau

- Le réseau est composé de N lignes de bus, de métro ou de tramway. Chaque ligne notée l ($1 \leq l \leq N$) comporte n_l stations notées s_k^l ($1 \leq k \leq n_l$).
- Chaque ligne l se voit affecter un certain nombre de véhicules notés v_i^l ($1 \leq i \leq m_l$). Ces véhicules sont assimilés à des trajets ou à des voyages (le véhicule v_i^l est équivalent à un trajet de la première à la dernière station s_1^l à $s_{n_l}^l$).
- Le tableau de marche initial contient les dates exactes de passages $d_{i,k}^l$ du véhicule v_i^l par la station s_k^l : $\forall l, 1 \leq l \leq N, \forall i, 1 \leq i \leq m_l, \forall k, 1 \leq k \leq n_l$ on a $d(v_i^l, s_k^l) = d_{i,k}^l$
- La charge du véhicule v_i^l est connue à chaque station s_k^l : $\forall l, 1 \leq l \leq N, \forall i, 1 \leq i \leq m_l, \forall k, 1 \leq k \leq n_l$ on a $C(v_i^l, s_k^l) = C_{i,k}^l$

Les dates de passage ont été calculées au préalable lors du processus de planification en tenant compte de plusieurs facteurs, comme les distributions statistiques d'arrivée des voyageurs afin d'assurer une qualité maximale de service. Ces distributions sont supposées connues et évaluées mathématiquement. Ainsi, nous désignons par $\mu_k^l(t)$ le nombre de voyageurs arrivant par unité de temps à la station s_k^l à l'instant t .

2.4.2 Description de la perturbation

Une perturbation est caractérisée par sa durée δ , par sa date d'apparition d_0 ainsi que par sa zone d'action. Un véhicule v_i^l , de la ligne l affecté par une telle perturbation arrivera à sa station à une date $(d_{i,k}^l)_{pert} = d_{i,k}^l + \delta$. Le problème consiste alors à trouver les nouvelles dates de passage $d_{i,k}^l$ des véhicules par les différentes stations telles que $d_{i,k}^l > d_0$.

Remarque : le mécanisme de régulation se déclenche uniquement dans le cas où cette durée dépasse une certaine valeur fixée par le régulateur (sinon on considère que la perturbation n'est pas importante et elle pourra être résorbée sans modifier les dates théoriques)

2.4.3 Description des contraintes

Le réseau de transport est soumis à un ensemble de contraintes relatives à la durée des trajets, au temps de transit et au retard maximal. Celles-ci doivent être respectées afin de

pouvoir obtenir des actions ou des solutions réalisables après application des décisions de régulation. Nous en avons dénombré quatre types :

- **Contraintes de traversée minimale** : Chaque véhicule a une durée minimale notée $dm_{i,k}^l$ pour passer de la station s_k^l à la station s_{k+1}^l . C'est-à-dire, $\forall l, 1 \leq l \leq N, \forall i, 1 \leq i \leq m_l, \forall k, 1 \leq k \leq n_j, d_{i,k+1}^l - d_{i,k}^l \geq dm_{i,k}^l$
- **Contraintes des dates de passage** : Ce sont les contraintes relatives aux dates de passage des véhicules aux différentes stations avant l'occurrence de la perturbation. On a alors $\forall d_{i,k}^l \leq d_0, d_{i,k}^l = d_{i,k}^l$
- **Contraintes de transit** : Ce sont les contraintes qui concernent la durée minimale nécessaire pour assurer une correspondance. Supposons que la ligne l_1 et la ligne l_2 se coupent en un nœud de correspondance à une station d'intersection $s_{k_1}^{l_1} = s_{k_2}^{l_2}$. A chaque véhicule $v_i^{l_1}$ de la ligne l_1 , on associe un véhicule $v_{\sigma(i)}^{l_2}$ qui arrivera après le véhicule $v_i^{l_1}$ pour prendre une proportion de voyageurs $\tau_{i,\sigma(i)}^{l_1,l_2}$ allant de $v_i^{l_1}$ vers $v_{\sigma(i)}^{l_2}$. Cette contrainte s'écrit alors : $d_{\sigma(i),k_2}^{l_2} - d_{i,k_2}^{l_1} \geq tr_{k_1,k_2}^{l_1,l_2}$.
- **Contraintes de retard maximal** : Selon la stratégie adoptée, retard ou avance des véhicules, on peut avoir des contraintes de type : $d_{i,k}^l - d_{i,k}^l \leq \pi_{i,k}^l$.

2.4.4 Description des critères

L'objectif de l'exploitant d'un réseau de transport est d'assurer une qualité de service irréprochable à l'ensemble des usagers malgré les éventuelles perturbations auxquelles est soumis le réseau. Il existe un ensemble de critères permettant de jauger la qualité de service offerte par l'exploitant. Nous distinguons :

a) Critère de régularité

Il correspond à la régularité des intervalles de temps séparant les passages successifs des véhicules à une station. Il correspond à la minimisation du temps d'attente des voyageurs dans les différentes stations. Nous supposons que, pour chaque station s_k^l , la distribution d'arrivée des passagers entre deux instants de départs successifs $d_{i,k}^l$ et $d_{i+1,k}^l$ de deux véhicules v_i^l et v_{i+1}^l d'une même ligne est constante et égale à $\mu_{s_k^l}$. La durée totale des attentes des voyageurs de la ligne l notée A_l est donc égale à la somme des attentes totales dans les différentes stations de cette dite ligne :

$$A_l = \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{i=1}^{m_l-1} \int_0^{d_{i+1,k}^l - d_{i,k}^l} \mu_k^l(t) (d_{i+1,k}^l + d_{i,k}^l - t) dt \quad (2.1)$$

Ramenée à la totalité des lignes du réseau pour l'ensemble des stations et des véhicules, cette équation devient :

$$A = \sum_{l=1}^N A_l = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{i=1}^{m_l-1} \int_0^{d_{i+1,k}^l - d_{i,k}^l} \mu_k^l(t) (d_{i+1,k}^l + d_{i,k}^l - t) dt \quad (2.2)$$

Dans le processus de régulation, ce critère sera exprimé sous forme de gain noté $E(A)$ sur le temps d'attente des voyageurs dans les différentes stations du réseau. Ce gain à maximiser égal à la différence des temps d'attente avant et après régulation s'exprime :

$$E(A) = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{i=1}^{m_l-1} \int_0^{d_{i+1,k}^l - d_{i,k}^l} \mu_k^l(t) (d_{i+1,k}^l + d_{i,k}^l - t) dt - \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{i=1}^{m_l-1} \int_0^{d_{i+1,k}^l - d_{i,k}^l} \mu_k^l(t) (d_{i+1,k}^l + d_{i,k}^l - t) dt \quad (2.3)$$

b) Critère de ponctualité

La ponctualité permet de respecter les horaires de passage des véhicules aux différentes stations. C'est un critère très sensible à l'égard des voyageurs, il permet entre autre de mesurer le degré de satisfaction de voyageurs. Il est conditionné par la durée du parcours. Le but est d'optimiser la durée totale des trajets à bord des différents véhicules selon leurs charges. Le gain sur l'augmentation des durées des trajets est donné par :

$$E(\Delta T) = \sum_{l=1}^N \sum_{k=2}^{n_l} \sum_{i=1}^{m_l} r_{i,k}^l C_{i,k-1}^l \quad (2.5)$$

Où $C_{i,k-1}^l$ représente la charge du véhicule v_i^l lors de son passage par la station s_{k-1}^l et $r_{i,k}^l$ le retard imposé par la régulation sur ce véhicule au niveau de la station s_k^l , ce retard est donné par la formule : $r_{i,k}^l = d_{i,k}^l - d_{i,k}^l$

c) Critère de correspondance

Ce critère est très important, il permet d'offrir à l'ensemble des voyageurs la garantie d'un service complet et homogène. Ce critère exprime un gain induit par la régulation sur la durée totale des correspondances [FAY 01]. Nous supposons que le nombre de voyageurs effectuant la correspondance de v_i^l vers $v_{\sigma(i)}^l$ est proportionnel à la charge v_i^l à son arrivée au nœud (l_1, k_1, l_2, k_2) avec un taux $\tau_{i,\sigma(i)}^{l_1,l_2}$. Le nombre de voyageurs en transit à chaque nœud de correspondance est calculé comme suit :

$$np(v_i^l \rightarrow v_{\sigma(i)}^l) = \tau_{i,\sigma(i)}^{l_1,l_2} C_{i,k_1-1}^l \quad (2.6)$$

Sur des périodes homogènes, nous pouvons considérer le taux $\tau_{i,\sigma(i)}^{l_1,l_2}$ comme constant pour l'ensemble des véhicules [FAY 03]. La durée totale de transfert ou l'attente totale des voyageurs en transit s'écrit donc :

$$A_{transit} = \sum_{\text{Noeud}} \sum_{\text{Véhicule } i} \text{attente des voyageurs} (v_i^l \rightarrow v_{\sigma(i)}^l) \quad (2.7)$$

En en déduit l'expression de la durée totale de transfert :

$$A_{transit} = \sum_{(l_1,k_1,l_2,k_2) \in \mathcal{S}} \sum_{i=1}^{m_{l_1}} \tau_{k_1,k_2}^{l_1,l_2} \cdot C'(v_i^l, s_{k_1-1}^l) \cdot (d_{\sigma(i),k_2}^l - d_{i,k_1}^l) \quad (2.8)$$

Ainsi, l'indicateur de qualité recherché correspond à la différence entre les durées des transits avec et sans régulation. Le gain sur la durée espérée des transferts que nous cherchons à maximiser s'écrit :

$$E(\Delta A_{transit}) = \sum_{(l_1, k_1, l_2, k_2) \in \mathfrak{S}} \sum_{i=1}^{m_{l_1}} \tau_{k_1, k_2}^{l_1, l_2} \cdot C(v_i^{l_1}, s_{k_1-1}^{l_1}) \cdot (d_{\sigma(i), k_2}^{l_2} - d_{i, k_1}^{l_1}) - \sum_{(l_1, k_1, l_2, k_2) \in \mathfrak{S}} \sum_{i=1}^{m_{l_1}} \tau_{k_1, k_2}^{l_1, l_2} \cdot C'(v_i^{l_1}, s_{k_1-1}^{l_1}) \cdot (d_{\sigma(i), k_2}^{l_2} - d_{i, k_1}^{l_1}) \quad (2.9)$$

3 Résolution du problème

Nous venons de définir le problème que nous espérons résoudre, dans ce paragraphe nous allons développer les étapes nécessaires à sa résolution. L'objectif de la régulation se trouve ainsi résumé dans les trois critères définis précédemment. Nous nous trouvons ainsi devant un problème d'optimisation avec plusieurs critères. Nous proposons alors d'utiliser une approche d'agrégation de ces trois critères que nous allons commencer par reformuler.

3.1 Formulation des critères pour le problème réel

Pour que la solution que nous proposons puisse reproduire fidèlement la réalité, il est nécessaire de tenir compte du maximum des paramètres réels régissant le réseau de transport. La charge des véhicules est un paramètre qu'il faut absolument prendre en compte. Suite à l'occurrence d'une perturbation, le flux de passagers en attente dans les stations se voit augmenter d'une façon significative en un temps très réduit. Il serait impossible d'enlever en un passage toute la charge des passagers attendant aux stations à cause de la capacité limitée des véhicules (Ch_{max}), de plus, certaines variables doivent être entières. Ces nouvelles contraintes rendent le problème difficile à résoudre à cause des termes 'min' et 'max' qui apparaissent dans les équations décrivant le système [CA/04/13]. Dans ce qui suit, nous allons définir les expressions de la charge des véhicules ainsi que le flux des passagers intégrant ces nouvelles contraintes.

3.1.1 Expression de la charge des véhicules

Notons $na_{i,k}^l$ et $na'_{i,k}^l$ le nombre de passagers qui ne peuvent pas monter dans le véhicule v_i^l à la station s_k^l respectivement avant et après application des décisions de régulation. On considère également $nd_{i,k}^l$ et $nd'_{i,k}^l$ le nombre de passagers qui descendent du dit véhicule respectivement avant et après application des décisions de régulation. La charge du véhicule évolue selon les règles suivantes :

- Le véhicule v_i^l ne peut pas enlever toute la charge présente à la station, il quittera la station avec sa charge maximale ($C_{i,k}^l = Ch_{max}$).
- Le véhicule v_i^l peut prendre la charge présente à la station s_k^l , sa charge est augmentée du nombre de passagers qui sont arrivés à la station entre deux départs successifs $d_{i,k}^l$ et $d_{i-1,k}^l$, et du nombre de passagers qui n'ont pas pu prendre le véhicule précédent v_{i-1}^l . Ces deux quantités ont comme expression $\mu_k^l (d_{i,k}^l - d_{i-1,k}^l) + na_{i-1,k}^l$ où

μ_k^l représente la distribution des arrivées des passagers à la station s_k^l entre les instants $d_{i,k}^l$ et $d_{i-1,k}^l$. La charge du véhicule v_i^l à son départ de la station s_k^l est donnée par :

$$C_{i,k}^l = \min\{C_{i,k-1}^l + \mu_k^l(d_{i,k}^l - d_{i,k-1}^l) - nd_{i,k}^l + na_{i-1,k}^l, Ch_{max}\} \quad (3.1)$$

Cette quantité doit être un entier (charge d'un véhicule) donc la quantité $\mu_k^l(d_{i,k}^l - d_{i-1,k}^l)$ doit être approximée par $zd_{i,k}^l$ tel que $\mu_k^l(d_{i,k}^l - d_{i-1,k}^l) \leq zd_{i,k}^l \leq \mu_k^l(d_{i,k}^l - d_{i-1,k}^l) + 1$. Ainsi, la charge sera exprimée comme suit :

$$C_{i,k}^l \approx \min\{C_{i,k-1}^l + zd_{i,k}^l - nd_{i,k}^l + na_{i-1,k}^l, Ch_{max}\} \quad (3.2)$$

3.1.2 Expression du flux de passagers attendant aux stations

Dans le cas où le véhicule v_i^l n'a pas pu enlever toute la charge se trouvant à la station s_k^l , le nombre de passagers qui attendent est donné par :

$$na_{i,k}^l = C_{i,k-1}^l + \mu_k^l(d_{i,k}^l - d_{i-1,k}^l) - nd_{i,k}^l + na_{i-1,k}^l - Ch_{max} \quad (3.3)$$

Comme c'est une quantité qui doit être entière, ce nombre sera exprimé comme suit :

$$na_{i,k}^l \approx C_{i,k-1}^l + zd_{i,k}^l - nd_{i,k}^l + na_{i-1,k}^l - Ch_{max} \quad (3.4)$$

Remarque : Dans le cas où le véhicule peut enlever toute la charge, le nombre restant sera bien évidemment égal à zéro ($na_{i,k}^l = 0$)

3.1.3 Expression du nombre de passagers descendant des véhicules

Nous supposons que le nombre de passagers qui descendent du véhicule v_i^l à la station s_k^l est proportionnel à sa charge à la station précédente on a $nd_{i,k-1}^l = \alpha_{i,k-1}^l C_{i,k-1}^l$. L'expression de la charge devient :

$$na_{i,k}^l = \max\{0, C_{i,k-1}^l + \mu_k^l(d_{i,k}^l - d_{i-1,k}^l) - nd_{i,k}^l + na_{i-1,k}^l - Ch_{max}\} \quad (3.5)$$

Et le nombre de passagers attendant dans la station devient :

$$C_{i,k}^l \approx \min\{(1 - \alpha_{i,k-1}^l)C_{i,k-1}^l + zd_{i,k}^l - na_{i-1,k}^l, Ch_{max}\} \quad (3.6)$$

Cette étape nous conduit à exprimer nos trois critères en fonction de ces nouvelles données.

3.1.4 Critère de régularité

En fonction des nouvelles données, le critère devient :

$$A = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{i=1}^{m_l-1} \left[\frac{\mu_k^l}{2} \cdot (d_{i+1,k}^l - d_{i,k}^l)^2 + H_{i,k}^l \right] \quad (3.7)$$

avec $H_{i,k}^l = na_{i,k}^l (d_{i+1,k}^l + d_{i,k}^l)$, nous posons $I_{i,k}^l = (d_{i+1,k}^l + d_{i,k}^l)$, le gain sur la régularité est :

$$E(\Delta A) = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^{n_l} \sum_{i=1}^{m_l-1} \left[\frac{\mu_k^l}{2} \cdot \left((I_{i,k}^l)^2 - (I_{i,k}^l)^2 \right) + (H_{i,k}^l - H_{i,k}^l) \right] \quad (3.8)$$

3.1.5 Critère de ponctualité

Ce critère peut s'exprimer de la manière suivante :

$$E(\Delta T) = \sum_{l=1}^N \sum_{k=2}^{n_l} \sum_{i=1}^{m_l} r_{i,k}^l C_{i,k-1}^l \quad (3.9)$$

où la charge s'exprime comme suit :

$$C_{i,k}^l = \min \left\{ (1 - \alpha_{i,k-1}^l) C_{i,k-1}^l + \mu_{k-1}^l (d_{i,k-1}^l - d_{i-1,k-1}^l) + na_{i-1,k-1}^l, Ch_{max} \right\} \quad (3.10)$$

et $r_{i,k}^l = d_{i,k}^l - d_{i,k}^l$

3.1.6 Critère de correspondance

Le critère est défini comme suit :

$$E(\Delta A_{transit}) = \sum_{(l_1, k_1, l_2, k_2) \in \mathfrak{S}} \sum_{i=1}^{m_{l_1}} \tau_{k_1, k_2}^{l_1, l_2} \cdot C(v_i^{l_1}, s_{k_1-1}^{l_1}) \cdot (d_{\sigma(i), k_2}^{l_2} - d_{i, k_1}^{l_1}) - \sum_{(l_1, k_1, l_2, k_2) \in \mathfrak{S}} \sum_{i=1}^{m_{l_1}} \tau_{k_1, k_2}^{l_1, l_2} \cdot C'(v_i^{l_1}, s_{k_1-1}^{l_1}) \cdot (d_{\sigma(i), k_2}^{l_2} - d_{i, k_1}^{l_1}) \quad (3.11)$$

$$\text{avec } C_{i,k-1}^l = \min \left\{ (1 - \alpha_{i,k-2}^l) C_{i,k-2}^l + \mu_{k-1}^l (d_{i,k-1}^l - d_{i-1,k-1}^l) + na_{i-1,k-1}^l, Ch_{max} \right\} \quad (3.12)$$

3.2 Méthodes de résolution

Nous nous trouvons incontestablement devant un problème multi-objectifs, il faut trouver une solution optimisant les trois critères définis dans le paragraphe précédent. Le problème est formulé comme suit :

$$\underset{x \in \Omega}{\text{Optimiser}} (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \quad (3.13)$$

Où x est une solution possible et Ω l'espace des solutions réalisables.

Afin de résoudre ce problème sans réduire les performances de la solution trouvée, nous utilisons une des techniques de résolutions multi-objectif basée sur l'approche de Pareto dominance, cette méthode donne un ensemble de solutions dont il faut choisir une qui reflétera les compromis opérés par le décideur par rapport aux différentes fonctions objectifs [HWA 79] [SRI 95] [FON 98] [TAL 99] [DAV 00a] [COL 02]. Rappelons que cette méthode initialement mise au point par Vilfredo Pareto dans le domaine de l'économie, fut étendue à de nombreux autres domaines où l'optimisation multi-critère est omniprésente comme ceux

qui nous intéressent tout particulièrement : les problèmes d'ordonnancement [SIR 94] [ISH 98] [T'KI 99] [BUR 00] [GZA 01] et les problèmes de transport [TOD 97]. Notons également que l'utilisation d'algorithmes polynomiaux pour résoudre ce type de problème est impossible à cause principalement des termes 'min' et 'max' apparaissant dans les différentes fonctions critères faisant intervenir la charge des véhicules qui doit être limitée. Nous proposons alors une approche basée sur les techniques du Soft computing à savoir les algorithmes génétiques qui ont vu leur utilisation s'accroître et se diversifier du fait de leur souplesse, de leur robustesse et de leur capacité à converger vers l'optimum global. Leur utilisation a connu un succès grandissant dans de nombreux domaines, notamment dans le transport ; gestion d'un système de transit de bus [DEB 98] [DEB 01], optimisation des réseaux de bus [XIO 92] [MOH 98] [KWA 99] [TAN 01] [BIE 02], optimisation des réseaux de chemin de fer [NAC 97] [SAL 97], recherche de l'itinéraire optimal [CHA 95] [KID 98] [MUR 98] [HAL 01] [NGA 03], problème de transit dans les nœuds de correspondance [ARA 84] [LI 91] [HAY 97] [BOR 02] [HAG 02], et problèmes de régulation de lignes de bus [ALO 99] [FAY 03]. L'utilisation des algorithmes génétiques pour la résolution de notre problème nécessite essentiellement des modifications au niveau du codage et une adaptation des autres opérateurs génétiques tels que le croisement et la mutation.

3.2.1 Codage proposé

Mahjoub DRIDI propose dans sa thèse un codage vecteur, il contient les dates de passages des véhicules aux différents arrêts, les individus ainsi construits respectent toujours les contraintes du problème et représenteront les tableaux de marche régulés (solution de notre problème). Pour un problème de transport de N lignes, où chaque ligne l est desservie par m_l véhicules et a n_l stations, la configuration d'un tel chromosome est la suivante :

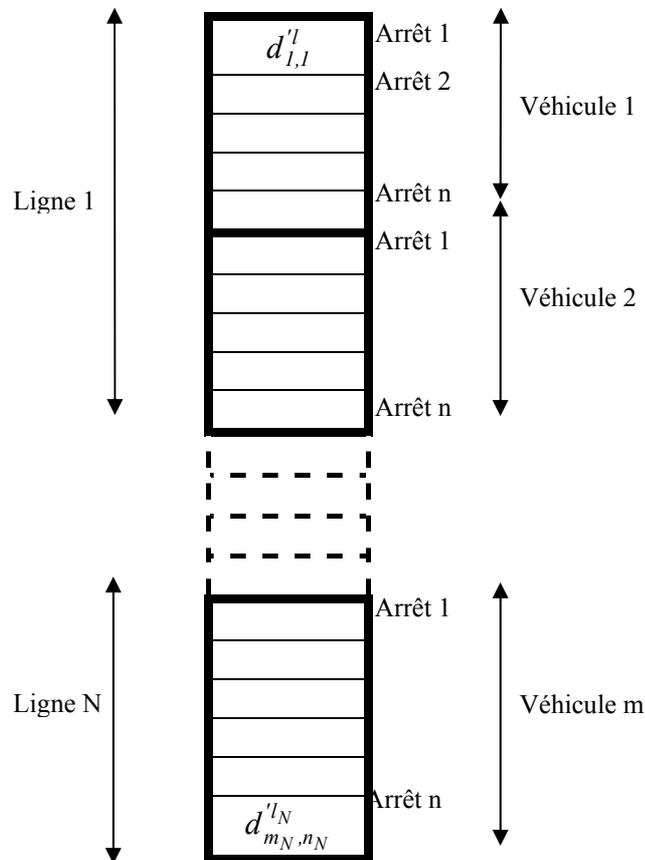


Figure 6 : codage des solutions pour N lignes

Exemple d'illustration : considérons l'exemple de deux lignes de bus, chaque ligne contient quatre stations et est desservie par deux bus. Les horaires de passages des bus aux différentes stations sont donnés dans les deux tableaux suivants :

Ligne 1	S1	S2	S3	S4
B1	10h:50	11h:00	11h:10	11h:20
B2	11h:05	11h:15	11h:25	11h:35

Ligne 2	S1	S2	S3	S4
B1	11h:08	11h:18	11h:28	11h:38
B2	11h:23	11h:33	11h:43	11h:53

Tableau 1 : Tableau de marche théorique

Le codage correspondant à cette configuration est le suivant :

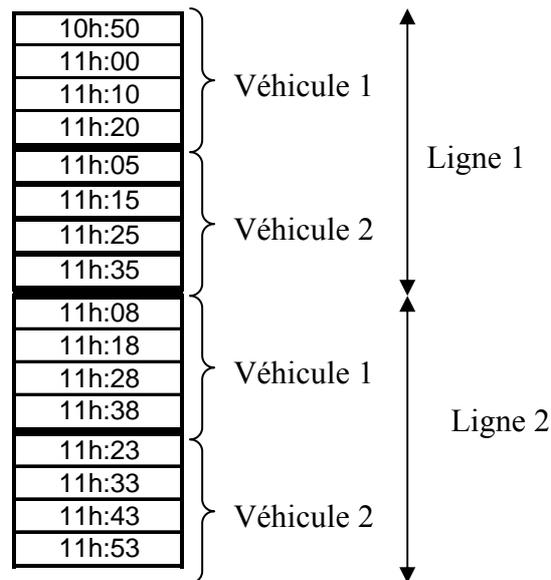


Figure 7 : Exemple de codage de solution

3.2.2 Opérateur de croisement

Le croisement est un opérateur assurant le brassage et la recombinaison des gènes parentaux pour former des descendants ayant des potentialités nouvelles. Le croisement proposé permettra de respecter les contraintes temporelles, il se décompose en quatre étapes :

- choisir les éléments de l'individu qui seront transmis aux enfants (un critère de choix possible est par exemple les lignes paires ou impaires),
- les éléments précédemment choisis du parent i seront transmis vers l'enfant i en gardant les mêmes emplacements,
- à chaque emplacement vide de l'enfant, déterminer l'intervalle de validité,
- transmettre les éléments du deuxième parent aux emplacements vides du premier enfant suivant l'appartenance à l'intervalle de validité. Le calcul de cet intervalle se fait à l'aide d'une heuristique qui donnera obligatoirement des enfants valides.

Cet algorithme s'illustre de la façon suivante :

Les éléments pairs vont être transmis aux enfants ; l'enfant E1 garde les mêmes dates que le parent P1 (respectivement l'enfant E2 garde les mêmes dates que le parent P2) ceci correspond aux dates de passages dans les stations $s_{k_i}^{l_1}, s_{k_{i+2}}^{l_1}, s_{k_{i+4}}^{l_1}, s_{k_f}^{l_1}$ ($s_{k_i}^{l_1}$ est la station initiale

et $s_{k_f}^{I_1}$ la station finale). Pour les autres stations (stations impaires), l'intervalle de validité $I_j(E1)$ (respectivement $I_j(E2)$) est déterminé comme suit : pour chaque station d'indice k_j (une station quelconque située dans le parcours du véhicule i) située entre deux stations d'indices k_{j-1} et k_{j+1} , nous définissons les deux bornes de l'intervalle comme suit :

la borne inférieure symbolisée par $a = d_{i,k_{j-1}}^{I_1}(P1) + dm_{i,k_{j-1}}^{I_1}(P1)$ et la borne supérieure par $b = d_{i,k_{j+1}}^{I_1}(P1) - dm_{i,k_{j+1}}^{I_1}(P1)$ avec $I_j = [a, b]$. A l'issue de ce calcul nous appliquons la règle suivante :

- Si $d_{i,k_j}^{I_1}(P2) \in I_j$ alors $d_{i,k_j}^{I_1}(E1) = d_{i,k_j}^{I_1}(P2)$ (respectivement parent 1 et enfant 2)
- Si $d_{i,k_j}^{I_1}(P2) \notin I_j$ alors nous allons borner la date de passage à la station concernée
 - Si $d_{i,k_j}^{I_1}(P2) < a$ alors $d_{i,k_j}^{I_1}(E1) = a$ (respectivement parent 1 et enfant 2)
 - Si $d_{i,k_j}^{I_1}(P2) > b$ alors $d_{i,k_j}^{I_1}(E1) = b$ (respectivement parent 1 et enfant 2)

Illustrons cette démarche par un petit exemple, soit le parent 1 et parent 2 suivant,

Parent 1			
Ligne I_1	S_{k_i}	$S_{k_{i+1}}$	$S_{k_{i+2}}$
$d_{i1,ski}^{I_1}$	10h:50	11:00	11:10

Parent 2			
Ligne I_1	S_{k_i}	$S_{k_{i+1}}$	$S_{k_{i+2}}$
$d_{i1,ski}^{I_1}$	11h:00	11h:18	11h:28

avec $\forall i,k,l \ dm_{i,k}^l = 5$ minutes, ce qui donne pour le parent 1 l'intervalle de validité suivant :

$I_j(P1) = [10h:55, 11h:05]$, et pour le parent 2 l'intervalle $I_j(P2) = [11h:13, 11h:23]$.

Les éléments choisis gardent les dates des parents, ce qui donne les enfants suivants :

Enfant 1 (en construction)			
Ligne I_1	S_{k_i}	$S_{k_{i+1}}$	$S_{k_{i+2}}$
$d_{i1,ski}^{I_1}$	10h:50		11:10

Enfant 2(en construction)			
Ligne I_1	S_{k_i}	$S_{k_{i+1}}$	$S_{k_{i+2}}$
$d_{i1,ski}^{I_1}$	11h:00		11h:28

En fonction de l'intervalle de validité, nous allons placer les parties restantes

Pour l'enfant 1 on a $d_{i,k_j}^{I_1}(P2) = 11h:18 \notin I_j(P1)$, durée supérieure à la borne supérieure de l'intervalle de validité, nous affectons alors cette dernière à la station concernée. De la même manière pour l'enfant 2, $d_{i,k_j}^{I_1}(P1) = 11h:00 \notin I_j(P1)$, elle est inférieure à la borne inférieure de l'intervalle de validité, nous utilisons dans ce cas cette borne à la station considérée. Nous obtenons enfin les deux enfants suivants :

Enfant 1			
Ligne I_1	S_{k_i}	$S_{k_{i+1}}$	$S_{k_{i+2}}$
$d_{i1,ski}^{I_1}$	10h:50	11:05	11:10

Enfant 2			
Ligne I_1	S_{k_i}	$S_{k_{i+1}}$	$S_{k_{i+2}}$
$d_{i1,ski}^{I_1}$	11h:00	11h:13	11h:28

3.2.2 Opérateur de mutation

La mutation est un mécanisme servant à apporter une légère modification dans un gène donc dans une seule solution dans le but d'introduire une certaine diversification dans la population que l'opérateur de croisement ne peut pas apporter. Dans notre cas, l'individu est représenté par des horaires de passages des véhicules aux différentes stations, la mutation

consistera à avancer ou à retarder les horaires d'arrivée aux différentes stations, ces modifications doivent être dans la limite de l'intervalle de validité défini précédemment afin de respecter les contraintes de correspondance imposées. Pour illustrer cette mutation prenons comme individu subissant la mutation, celui représentant le parent 1 dans le processus de croisement, son intervalle de validité est : $I_j=[10h:55,11h:05]$, l'avance ou le retard à apporter ne doit être en dehors de I_j , prenons un retard de 3 minutes,

Ligne I_1	S_{ki}	S_{ki+1}	S_{ki+2}
$d_{i1,ski}^{iii}$	10h:50	11h:00	11:10

Ligne I_1	S_{ki}	S_{ki+1}	S_{ki+2}
$d_{i1,ski}^{iii}$	10h:50	11h:03	11:10

3.2.4 Construction de la population initiale

Le choix de la population initiale joue un rôle primordial dans l'évolution de la solution tout au long des générations. En effet, il faut obtenir une population suffisamment diversifiée pour que l'algorithme ne reste pas bloqué dans un optimum local. Le plus souvent, cette population de démarrage est mise au point d'une façon aléatoire. Dans notre cas, cette répartition aléatoire conduit à l'obtention d'individus irréalisables, ne respectant pas les contraintes du problème. DRIDI dans sa thèse s'est orienté vers l'obtention d'une première solution viable, c'est-à-dire un tableau de marche régulé, puis il a procédé à des mutations successives sur cette solution tout en respectant les différentes contraintes (les contraintes temporelles et les contraintes de correspondance) comme le permet l'opérateur de mutation qui à été mis au point.

3.2.5 Détermination de la fonction d'évaluation

Comme nous l'avons indiqué au début de ce paragraphe, nous nous trouvons devant un problème d'optimisation multi-objectifs. Nous devons optimiser trois fonctions qui sont :

- f_1 : gain sur l'attente totale des passagers aux arrêts, (fonction à maximiser)
- f_2 : gain sur les temps d'attente aux nœuds de correspondance, (fonction à maximiser)
- f_3 : gain sur l'augmentation du temps total de trajet. (fonction à minimiser)

La fonction à optimiser est une agrégation de ces trois fonctions avec des coefficients de pondération, elle se présente sous la forme :

$$f(x) = w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) - w_3 f_3(x)$$

Afin de juger de l'efficacité de la méthode utilisée, il est d'usage de comparer la solution trouvée aux bornes pour les critères considérés en relaxant les contraintes du problème. Nous désignons par $x_f^{est} = (x_f^{1est}, x_f^{2est}, x_f^{3est}, \dots, x_f^{rest})^T$ la solution estimée de la fonction $f(x)$. Pour cela, il suffit pour chaque fonction de considérer le coefficient de pondération de la fonction concernée égal à 1 et les autres à zéro, ainsi l'avantage absolu est attribué à cette dite fonction. Ainsi nous obtenons pour f_1 : $x_{f_1}^{est} = (x_{f_1}^{1est}, x_{f_1}^{2est}, x_{f_1}^{3est}, \dots, x_{f_1}^{rest})^T$. Pour des raisons de commodité d'écriture on pose $f(x_{f_1}^{est}) = f_1^{est}$. Il sera de même pour $f(x_{f_2}^{est}) = f_2^{est}$, et $f(x_{f_3}^{est}) = f_3^{est}$

L'évaluation d'une telle fonction (la fonction $f(x) = \sum_{i=1}^L w_i f_i(x)$) n'est pas chose facile. En effet, selon l'état du trafic et les objectifs voulus par le processus de régulation, les critères n'auront pas la même importance. Certes, cette approche dite agrégative permet d'obtenir de bons résultats mais il arrive que le régulateur n'ait pas de préférence particulière sur un critère. Il devient alors nécessaire d'apporter une solution pour permettre un choix de direction qui optimise tous les critères en même temps. L'idée étant d'avoir une prospection dynamique de l'espace de recherche. L'approche utilisée est basée sur la notion de Pareto dominance dans laquelle on utilise une règle floue pour calculer dynamiquement les poids " w_i " des différentes fonctions objectifs $f_i(.)$. Cette méthode permet de mesurer la qualité des solutions selon chaque critère à chaque itération et de calculer les poids en conséquence favorisant ainsi une direction par rapport aux autres [KAC 03].

Soit f_i^k la moyenne des solutions de la $i^{\text{ème}}$ fonction objectif trouvée avec l'algorithme génétique à la $k^{\text{ème}}$ itération et P_k la population des solutions. On a

$$f_i^k = \frac{\sum_{x \in P_k} f_i^k}{\text{Cardinal}(P_k)}$$

Pour chaque vecteur $f(x)$ et à chaque itération, l'évolution des solutions est faite en utilisant les fonctions d'appartenance (fuzzification selon la terminologie floue) selon leurs positions dans les intervalles $[f_i^{\text{est}}, f_i^0 + \varepsilon_i]$, où ε_i est une petite valeur positive conçue pour éviter un problème de division par zéro. Nous considérons pour chaque critère deux sous-ensembles flous :

- Procheⁱ : le sous-ensemble des solutions proches de la valeur de f_i^{est} selon le $i^{\text{ème}}$ objectif
- Loinⁱ : le sous-ensemble des solutions loin de la valeur de f_i^{est} selon le $i^{\text{ème}}$ objectif

Par conséquent, les fonctions d'appartenances sont formulées comme suit :

$$A_i(f_i^k) = \frac{f_i^{\text{est}} - f_i^k}{f_i^{\text{est}} - f_i^0 + \varepsilon_i} \text{ si } f_i^k \in [f_i^{\text{est}}, f_i^0 + \varepsilon_i] \text{ sinon } A_i(f_i^k) = 1$$

Ainsi, les différents poids w_i^{k+1} sont calculés de façon dynamique selon la distance entre les

estimateurs et la moyenne des individus de chaque génération $w_i^{k+1} = \frac{A_i(f_i^k)}{\sum_{i=1}^3 A_i(f_i^k)}$

De cette manière, les w_i^{k+1} vont suivre les règles instaurées par la logique floue, les poids correspondants aux différents critères vont augmenter ou diminuer d'une itération à l'autre en fonction de la distance séparant la moyenne du critère considéré de sa borne.

L'utilisation de ces règles floues, rend possible le contrôler de la direction de la recherche, afin de construire un ensemble final avec des solutions s'approchant le plus possible des valeurs optimales. Nous gardons ainsi parmi cet ensemble uniquement les solutions dominantes au sens de Pareto.

4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des travaux de recherche de Mahjoub DRIDI dans le cadre de sa thèse. Ces travaux ont été menés au sein de notre équipe sous la direction conjointe du Professeur BORNE et de moi-même. Le sujet traitait le problème de la gestion du trafic dans les réseaux de transport multimodal. Ses travaux se divisent en deux parties.

La première partie consistait à mettre en place une modélisation des systèmes de transport basée sur les réseaux de Petri colorés orientés objets permettant de comprendre le fonctionnement du réseau de transport dans ces deux modes : normal et perturbé, et de dégager les principales caractéristiques des ressources les composant, facilitant ainsi les tâches décisionnelles.

La deuxième partie proposait un système d'aide à la décision basé sur deux modules. Un module d'évaluation des critères, visant à résoudre le problème en relaxant la contrainte de capacité (véhicule supposé de capacité illimitée) permettant ainsi sa résolution par les méthodes directes, le but étant d'identifier les solutions dominantes (au sens de Pareto) en calculant un estimateur permettant de mesurer la qualité de chaque critère. L'autre module réintègre la contrainte de capacité et propose une approche basée sur les algorithmes évolutionnistes. Cette approche a permis de construire un ensemble de solutions optimisant les critères liés aux temps d'attente des usagers dans les stations et en correspondance. Dans ce cadre, un nouveau codage et de nouveaux opérateurs de mutation et de croisement ont été proposés.

Ces deux modules ainsi couplés permettent aux régulateurs de calculer au préalable un ensemble d'estimateurs des critères étudiés facilitant ainsi le classement et le choix entre les différentes solutions obtenues.

OPTIMISATION DE L'ORDONNANCEMENT EN MILIEU INCERTAIN

1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous proposons de présenter les travaux que nous avons menés en collaboration avec l'ENSAIT et dont le but a été de mettre en commun nos connaissances et de proposer une nouvelle approche pour les problèmes d'ordonnancement et d'optimisation à partir de données aléatoires ou incertaines.

Cet axe de recherche s'inscrit dans le cadre du projet régional MOST du programme TACT. Cette collaboration était faite avec le Professeur Besoa RABENASOLO du laboratoire GEMTEX de l'ENSAIT et avait pour objectif :

- la mise en commun des ressources disponibles (bibliographie, algorithmes, modèles etc.),
- l'amélioration des méthodes de résolution pour des problèmes de grande taille, (vitesse de résolution, méthodes de décomposition, métaheuristiques, combinaison de méthodes)
- la comparaison des résultats obtenus par des méthodes exactes et des méthodes heuristiques.

Ainsi, Djamel BERKOUNE avait commencé son travail de recherche dans le cadre de son stage de DEA (Master de Recherche actuellement) et avait poursuivi en thèse de doctorat sur cette thématique. Le but de son travail était d'étudier les problèmes d'ordonnancement prévisionnel et de proposer des techniques et algorithmes pour leur résolution et leur optimisation.

La prise en compte de données incertaines permet (intuitivement) de se rapprocher de la réalité industrielle. L'intérêt de telles études n'est plus à démontrer aujourd'hui puisque toutes les entreprises sont concernées par la complexité croissante de l'industrie qui tient principalement au caractère de plus en plus réparti de son organisation, lié en partie à la spécialisation des métiers et à l'optimisation des coûts. Une des qualités essentielles d'une entreprise moderne doit être sa capacité de réaction rapide aux changements externes et internes. Les décisions opérationnelles à court terme doivent parfaitement s'intégrer dans le plan directeur, car celui-ci définit le schéma tactique de production, de stockage et d'utilisation des ressources. Cet idéal est pourtant rarement réalisé par le plan directeur. Pour combler cette lacune, il est donc primordial d'associer plus étroitement les outils prévisionnels à la fonction de planification, en particulier ; la prévision, la demande et la défaillance des ressources.

Nous donnons dans la suite de ce chapitre le détail des techniques et algorithmes proposés dans le cadre de ce travail ainsi que les principaux résultats obtenus.

2 Formulation du problème

A l'heure actuelle, les structures de production sont en pleine évolution, notamment du fait de l'apparition de nouveaux types de flexibilité. Cet accroissement et cet élargissement de la flexibilité portent essentiellement sur deux points : les commandes et les ressources humaines.

Le développement de techniques de communication de plus en plus évoluées et rapides a créé une forme de vente plus flexible. En effet, les réseaux de communication ont permis l'émergence du commerce électronique, conduisant à des passations de commandes plus rapides et plus aisées, mais aussi moins certaines. Les PME, généralement sous-traitants de grands donneurs d'ordre, sont aussi de plus en plus souvent au cœur de la chaîne logistique (Supply Chain) et doivent être en mesure de répondre le plus rapidement possible à des commandes qui ne sont pas toujours entièrement sûres. Ainsi, les gestionnaires d'ateliers doivent gérer une charge en partie incertaine et imprécise, et à partir de cela, être capables de faire un ordonnancement prévisionnel et d'en extraire une évaluation des délais de fabrication, afin de finaliser les commandes en cours. S'ajoute à cela un deuxième type de flexibilité lié aux opérateurs de production. En effet, la réduction du temps de travail met en lumière de nouvelles possibilités de flexibilité sur les durées de travail et les compétences des ressources humaines. Les entreprises doivent envisager une adéquation entre les compétences disponibles et les compétences requises et veiller à prendre en compte la disponibilité des ressources humaines autant que techniques au niveau de l'ordonnancement.

Cette évolution des structures productives (apparition de nouveaux types de flexibilité concernant les commandes et les opérateurs de production) a rendu nécessaire la diminution des délais de livraison, même si cela implique une prise de risques par l'intégration rapide de commandes non sûres. Le gestionnaire d'atelier doit pouvoir réaliser un ordonnancement prévisionnel et en déduire des propositions de dates de livraison pour les commandes planifiées, alors qu'une partie d'entre elles est encore en cours de négociation.

2.1 Définition du problème

Généralement, la résolution des problèmes d'ordonnancement déterministe (les opérations et les ordres de fabrication sont connus à l'avance) conduit à l'obtention d'une solution optimisant un ou plusieurs critères comme la date d'achèvement de la dernière opération à exécuter (Makespan), le retard maximal (Lateness), la charge de travail (Workload), le coût (Coast), etc. [CHU 96]. Cependant, ces solutions montrent que les ressources sont souvent sous-utilisées. Le travail que nous présentons permet d'occuper le temps d'inactivité par l'ajout d'opérations pouvant être des commandes prévisionnelles (un ensemble d'ordre de fabrication avec des caractéristiques incertaines), des ordres de fabrications urgents ou simplement des opérations de maintenance. L'anticipation de ces activités permettra une meilleure prise en compte de la charge de travail. La figure 8 montre un exemple d'ordonnancement sous forme de diagramme de Gantt optimisant le Makespan d'un problème présentant dix ordres de fabrication dont chacun est constitué de trois opérations affectées à un ensemble de dix machines totalement flexibles, le Makespan obtenu dans ce cas vaut 7 unités de temps.

Nous remarquons qu'il y a plusieurs périodes de non activité pour certaines machines, il nous est alors facile de calculer le taux d'activité ou de productivité des machines comme étant le rapport du temps travaillé sur le temps disponible, dans cet exemple $r = \frac{54}{70} = 77,14\%$. Ceci signifie qu'approximativement un quart du temps disponible n'a pas été travaillé

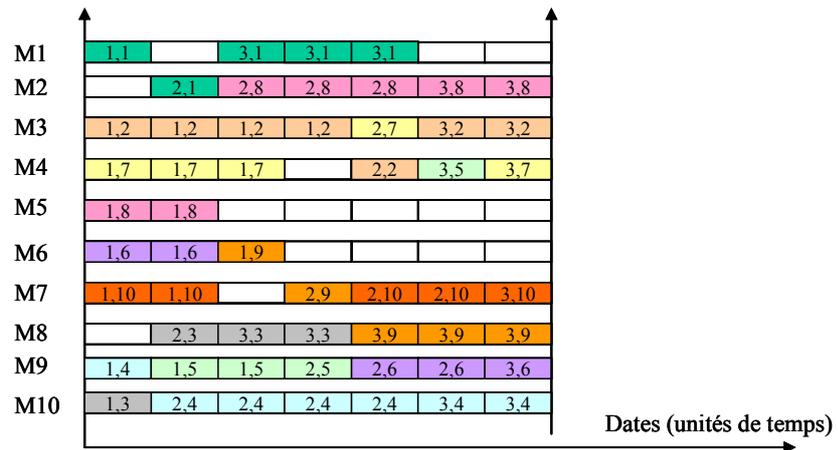


Figure 8 : solution d'ordonnement de 10 ordres de fabrication sur 10 machines

Ces constatations nous conduisent à se poser les questions suivantes :

- 1) Comment utiliser les périodes d'inactivité des machines ; Il n'est pas rare de voir dans des situations de production réelles, des ordres de fabrications ajoutés au plan de production pour des produits qui ne sont pas encore confirmés. Cet ajout se fait sur la base d'un ensemble d'observations commerciales. Ce problème demande la définition d'un ensemble de critères, et l'évaluation des risques de non vente, du surcoût de stock, etc.
- 2) Comment obtenir un ordonnancement dynamique avec des ordres de fabrication qui s'ajoutent d'une façon aléatoire en fonction de la variation stochastique de la demande.

Les études trouvées dans la littérature traitant de ce problème concernent le plus souvent des incertitudes dans les données (durées opératoires, périodes de disponibilité des ressources), également des incertitudes dans les modèles (contraintes non ou mal connues) [DAV 00b] [DUB 01] [LIN 04], mais rarement sur les activités (ajout de tâche). Nous traitons dans cette partie les incertitudes portant sur les ordres de fabrication supplémentaires à ajouter à l'ordonnement des ordres déjà répertoriés ou connus. Notre travail consiste à intégrer ces ordres supplémentaires et à proposer une solution d'ordonnement optimisant un ou plusieurs critères. Nous ne considérons que les modèles dont les demandes prévisionnelles sont déterminées par des densités de probabilité définies. La mise au point de ces modèles prévisionnels n'est pas chose facile. En effet, on trouve dans la littérature différents types de modèles. Parmi eux, les modèles récurrents simples tels que le lissage exponentiel [WIN 60] [BRO 62], des modèles linéaires généraux qui sont très utilisés dans de nombreux logiciels et possèdent une base théorique très vaste [BOX 76] [MAK 98], des modèles non linéaires [TON 89] ainsi que des modèles basés sur les techniques plus récentes comme les réseaux neuronaux [ZHA 99] et la logique floue [FIO 99].

Nous nous sommes intéressés dans le cadre de la thèse de Djamel BERKOUNE aux problèmes d'insertion de demandes prévisionnelles dans un atelier de type job-shop flexible. Outre la difficulté de trouver un ordonnancement réalisable optimisant un ou plusieurs critères en un temps raisonnable pour le problème déterministe (c.à.d l'ordonnement des ordres fermes) du fait de l'appartenance de ce type de problème à la classe des problèmes NP-difficiles [GAR 79] [CAR 88] [ESQ 01], nous sommes confrontés à un deuxième problème qui consiste à placer les ordres prévisionnels dans les solutions existantes tout en optimisant

tout ou une partie des critères posés pour les ordres fermes et prévisionnels. Pour ce faire, nous avons appliqué les algorithmes génétiques afin de trouver une ou plusieurs solutions pour les demandes fermes (ordres de fabrication connus avant de débiter l'ordonnancement) et nous avons utilisé des heuristiques pour insérer les ordres prévisionnels, urgents ou même de maintenance. Notre objectif est de proposer une, voir plusieurs solutions pour les ordres fermes et prévisionnels optimisant un ou plusieurs critères. Comme notre problème appartient à la classe NP-difficile, nous n'avons aucun moyen (il serait très coûteux en temps et très difficile en termes de base théorique) de connaître les valeurs optimales de nos critères. Nous avons proposé dans ce cas, de mesurer l'écart entre les solutions trouvées et les limites inférieures des critères étudiés. D'autre part, et dans le cadre de l'optimisation et/ou de la décision multicritère, des difficultés peuvent apparaître, telles que les incertitudes sur l'expression des choix et des préférences données soit par un décideur, soit par un utilisateur. Il s'ensuit que pour une telle donnée subjective, nous ne pouvons pas toujours satisfaire nos objectifs. Une étude multicritère du problème traité est nécessaire afin de répondre au mieux aux attentes des décideurs. L'idée générale proposée pour la résolution de notre problème est résumé dans l'organigramme suivant :

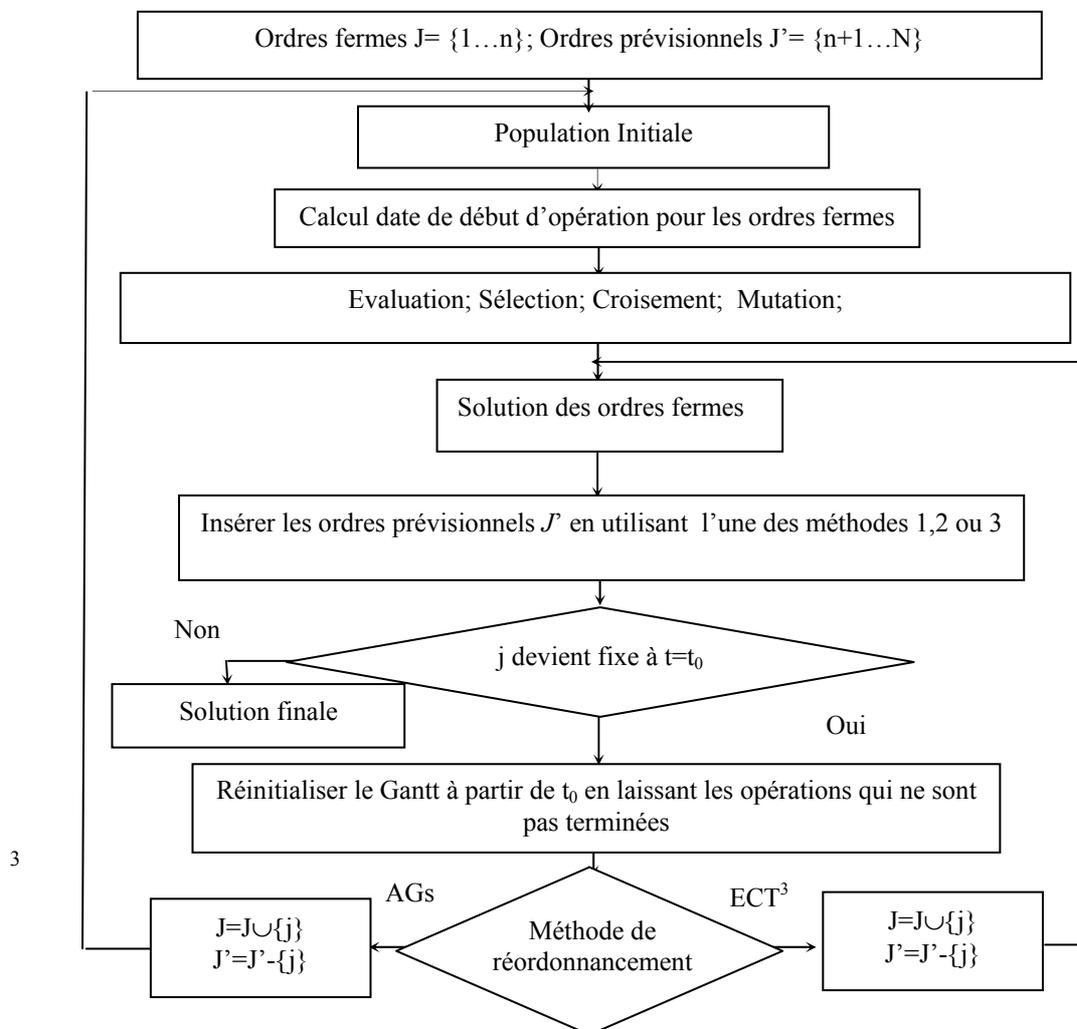


Figure 9 : Procédure de résolution

³ ECT : Earliest Completion Time (Temps d'accomplissement le plus proche)

2.1.1 Formulation mathématique

Le problème consiste à organiser l'exécution d'un ensemble de N ordres de fabrication ($N = n + n'$, avec n ordres fermes et n' ordres prévisionnels), sur un ensemble de M machines. Chaque ordre j est constitué de n_j opérations non préemptibles. L'exécution de chaque opération i de l'ordre j notée O_{ij} nécessite une des machines de l'ensemble disponible avec une date de début au plus tôt r_{ij} (la date de début au plus tôt de l'ordre j est $r_j = r_{1j}$) et une contrainte de précédence ($r_{i+1,j} \geq r_{ij} + p_{ijm}$). A chaque opération O_{ij} est associée un ensemble de durées opératoires sur l'ensemble des machines (p_{ijm} ; $1 \leq m \leq M$). Un ordonnancement consiste à attribuer à chaque opération O_{ij} une machine m ($x_{ijm} = 1$, avec x_{ijm} le coefficient d'affectation de l'opération O_{ij} sur la machine m); et une date de début. La date de fin de l'opération sera calculée en fonction de la durée opératoire dépendant de la machine sur laquelle elle sera exécutée. La date de fin de l'ordre de fabrication est notée C_j .

Ce problème est soumis aux hypothèses suivantes :

- Les machines sont indépendantes les unes des autres ;
- Toutes les machines sont disponibles à la date $t = 0$;
- Tous les ordres de fabrication sont indépendants les uns des autres et peuvent être commencés à la date $t = 0$;
- Une machine ne peut exécuter qu'une seule opération à un instant donné (contrainte de disponibilité) ;
- Contrainte de précédence des opérations, $r_{i+1,j} \geq r_{i,j} + p_{i,m}$

Notre problème d'ordonnancement se décompose en deux sous problèmes :

1. un sous problème d'ordonnancement des ordres fermes (demandes confirmées) dont le but est d'optimiser la fonction objectif (le makespan et/ou le coût de production).
2. un sous problème d'insertion des opérations prévisionnelles dans la ou les solutions proposées par la première partie.

Nous utiliserons par la suite les notations suivantes :

O_{ij}	: opération i de l'ordre j
N	: nombre total des ordres de fabrication
n	: nombre de ordres fermes
n_j	: nombre d'opérations de l'ordre j
M	: nombre total de machines
$x_{i,m}$: coefficient d'affectation de l'opération O_{ij} sur la machine m , $x_{ijm} \in \{0,1\}$
F_j	: coût de fabrication de l'ordre j
MP_j	: coût de la matière première de l'ordre j
C_j	: date de fin d'exécution de l'ordre j
S_j	: coût de stockage de l'ordre j
P_j	: coût de pénalité de l'ordre j
C	: coût total de production
L_m	: coût de lancement de la machine m
CS_j	: coût de stockage de l'ordre j par unité de temps
Cp_j	: coût de pénalisation de l'ordre j par unité de temps
p_{ijm}	durée d'exécution de O_{ij} sur la machine m

C_{ijm} : date de fin de l'opération O_{ij} sur la machine m
 $Coût_{ijm}$: coût de fabrication de l'opération O_{ij} sur la machine m
 CM_m : coût de production par unité de temps sur la machine m
 d_j : date de livraison de l'ordre j
 E_j, T_j : durée respectivement de stockage et de retard
 $Pr[d]$: probabilité de date de livraison $d_j = d$.
 V_j : prix de vente de l'ordre j
 D_j : l'ensemble de dates de livraison possibles pour l'ordre prévisionnel j
 \mathcal{R}_m : ensemble des possibilités de dates d'insertion sur la machine m
 TP_{sm} : $s^{\text{ème}}$ temps d'insertion sur la machine m (minimum de l'ensemble \mathcal{R}_m)
 $[a, b]_m$: intervalle de disponibilité de la machine m ($a \in \mathcal{R}_m$)

Les critères considérés dans cette étude sont :

- la minimisation du makespan : c'est-à-dire la durée totale de la production décrite par l'équation suivante :

$$Makespan = \text{Max}\{C_j | j = 1..N\} \quad (2.1)$$

où C_j est la date de fin du *job* j .

- la minimisation de coût total de production : C'est la somme des coûts de fabrication, de stockage, de pénalité de l'ordre j , et le coût de lancement de la machine m (le coût de redémarrage). Ce qui conduit à obtenir l'équation suivante :

$$C = \sum_{j=1}^N F_j + \sum_{j=1}^N S_j + \sum_{j=1}^N P_j + \sum_{m=1}^M L_m \quad (2.2)$$

Le coût de fabrication est fonction de la matière première et du coût opératoire sur les machines :

$$F_j = MP_j + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{n_j} x_{ijm} CM_m p_{ijm} \quad (2.3)$$

Le coût des pénalités des ordres est fonction du coût unitaire et de la durée du retard :

$$P_j = Cp_j T_j \quad \text{ou} \quad T_j = \max(0, C_j - d_j) \quad (2.4)$$

De la même façon, le coût de stockage est fonction du coût unitaire et de la durée de stockage :

$$S_j = Cs_j E_j \quad \text{ou} \quad E_j = |\min(0, C_j - d_j)| \quad (2.5)$$

Concernant les ordres prévisionnels, on s'intéresse plutôt à une espérance mathématique

L'espérance mathématique du coût de stockage de l'ordre prévisionnel j dépend de la probabilité de stockage, cette quantité décroît en fonction de l'avance de production :

$$S_j = \sum_{d \in D_j} Cs_j E_j(d) Pr[d] \quad \text{ou} \quad E_j(d) = |\min(0, C_j - d_j)| \quad (2.6)$$

Le profit est :

$$profit = \sum_{j=1}^n V_j - C \quad (2.7)$$

En suivant l'organigramme présenté plus haut, nous avons commencé à ordonnancer les ordres fermes en utilisant les algorithmes génétiques. Le choix de ces derniers s'est imposé

tout naturellement. Ils ont la capacité d'optimiser des fonctions complexes ; discontinues, multimodales, bruitées [GOL 89] [DAV 91] [HOL 92] [MIC 92] [FON 95] [REN 95] [MAN 97] [PLA 98], notamment dans les problèmes d'ordonnancement [POR 96] [RI/99/2] [PON 01] [BER 04] [MAT 04] [PON 04]. Ils offrent un nombre important d'avantages utiles à la résolution du type de problèmes qui nous concerne ; nous pouvons citer quelques uns comme :

- l'obtention d'une solution proche de "l'optimum" en un temps réduit,
- l'indépendance presque totale du problème à optimiser,
- l'obtention d'un ensemble de solutions ayant la même valeur des critères à optimiser,

La résolution de cette partie est basée essentiellement sur mes travaux de thèse [MES 99] auxquels BERKOUNE a apporté des améliorations notamment dans les opérateurs génétiques comme le croisement et la mutation [BER 05]. L'une des difficultés majeures de l'application des algorithmes génétiques pour la résolution des problèmes d'ordonnancement est la mise en place d'une représentation de la solution n'engendrant pas de difficultés particulières comme par exemple l'obtention de solutions irréalisables [DEL 95] [RI/98/1]

Nous avons mis au point un codage que nous avons nommé "codage parallèle des ordres de fabrication : CPOF" [RI/04/3], ainsi qu'un ensemble d'opérateurs génétiques comme le croisement et la mutation adaptable à notre codage le CPOF. Cette démarche nous a permis d'aboutir à des résultats très satisfaisants [CA/04/15]. Néanmoins, notre but était de pouvoir introduire des demandes prévisionnelles dans une solution déjà "optimisée" pour les ordres fermes et de comparer la solution obtenue avec les bornes inférieures calculées pour les deux critères considérés (optimisation multicritères) afin de s'assurer de la bonne qualité de la solution.

La partie suivante est divisée en deux étapes ; les méthodes d'insertion des ordres prévisionnels, et les algorithmes mis au point pour le calcul des bornes inférieures pour les critères considérés.

2.2 Méthodes d'insertion

On s'intéresse maintenant à la résolution des problèmes d'ordonnancement avec un modèle des demandes incertaines. Nous proposons quelques méthodes qui permettent d'insérer ces ordres supplémentaires. Le problème initial se voit augmenter d'un certain nombre d'ordres de fabrication à ordonnancer. Rappelons que nous résolvons le problème en deux étapes ; ordonnancement des ordres fermes par les algorithmes génétiques, puis insertion des tâches prévisionnelles en respectant les contraintes de production.

Parmi les différentes heuristiques proposées pour résoudre ces problèmes d'incertitude on trouve principalement celles liées à l'insertion de tâche urgente sur les ressources cumulatives [ART 03], ainsi que celles traitant des urgences dans le domaine hospitalier [HAM 03] [JEB 03]. En partant de ce constat, nous proposons plusieurs méthodes d'insertion [CA/04/14] [CA/04/15]. Deux concernent l'introduction des tâches supplémentaires dans l'ordonnancement en cours. La première nommée "*insertion statique*" se contente d'insérer les ordres supplémentaires dans les disponibilités des machines, la deuxième étant "*insertion dynamique ou en temps réel*" consiste à refaire l'ordonnancement si un événement change les données du problème initial. Cette dernière méthode permet d'insérer les demandes urgentes

qui ont une date de livraison très contraignante (serrée) par rapport aux ordres fermes. L'objectif que nous nous sommes donné était la minimisation de l'impact de l'insertion sur la durée totale et le coût de production. Après avoir étudié les solutions déjà existantes, on s'est attaché à définir une approche plus souple à utiliser, tout en restant dans un domaine de performance acceptable.

2.2.1 Insertion statique

La procédure d'insertion statique revient à proposer une séquence déjà optimisée pour les ordres fermes, augmentée de l'ensemble des opérations appartenant aux demandes prévisionnelles. Ce nouvel ordonnancement doit être trouvé avec le minimum de perturbation possible sur les ordres fermes en respectant les deux conditions suivantes :

- pas de changement de l'affectation des opérations déjà ordonnancées,
- violation minimale des dates de fin des opérations déjà ordonnancées,

Comme pour un problème d'ordonnancement classique, nous devons effectuer l'affectation, puis proposer un ordonnancement. Nous proposons deux techniques.

a) Insertion dans les disponibilités machines

Cette procédure nous permet d'insérer les ordres prévisionnels dans les périodes d'inactivité des machines, et ceci sans modifier l'ordonnancement initial des ordres fermes (déjà optimisé). L'insertion doit se faire en appliquant une règle de priorité spécifique. Nous avons choisi la règle ECT (Earliest Completion Time) [KEL 99] qui considère en priorité la période de disponibilité machine où l'opération possède le temps d'accomplissement le plus court. Cela vise intuitivement à réduire la date de fin de production (*makespan*). Dans le cas où l'objectif est de réduire le coût de production, on insère l'opération dans la période de disponibilité la moins coûteuse. L'algorithme de cette méthode est disponible dans [BER 02] [BER 05].

b) Elargissement de la fenêtre des périodes de disponibilité des machines

Dans le cas, où les périodes d'inactivité des machines sont insuffisantes pour insérer les tâches des ordres prévisionnels, on procède à l'élargissement des fenêtres temps de celle-ci. Cette procédure nous permet de réduire le coût de production de tous les ordres (*fermes* et prévisionnels), en évitant la remise en marche des machines pendant les périodes de production. Cette méthode modifie la solution initiale (demandes fermes), mais peut conduire à une meilleure solution de l'ensemble (demandes fermes et prévisionnelles). Elle est particulièrement intéressante pour des processus où le coût de lancement des machines (L_m) est élevé. L'algorithme de cette méthode est également disponible dans [BER 02] [BER 05]

2.2.2 Insertion dynamique

Cette procédure d'insertion ou plutôt de ré-ordonnancement partiel ou total, consiste à réordonner la totalité ou une partie des tâches de la totalité du problème c'est-à-dire des ordres fermes et prévisionnels dès lors qu'un événement extérieur change les données du problème initial comme par exemple, une demande prévisionnelle devient ferme à un instant t , ou l'avènement d'un ordre urgent à traiter en priorité. Cette approche peut s'effectuer par deux méthodes.

a) Création des disponibilités machines

Cette méthode est recommandée dans le traitement des ordres urgents, elle s'inspire de la méthode appliquée dans le milieu hospitalier pour le traitement des urgences [HAM 03]. Cette procédure crée des disponibilités machines qui n'existent pas initialement pour insérer un nouvel ordre déterministe avec une date de livraison pressante (serrée). C'est le cas si les données du problème ou le statut des ordres changent à une date donnée ($t > 0$). Cette méthode aura comme conséquence la modification de la solution initiale [CA/04/14] [BER, 05]. L'algorithme de cette méthode se présente comme suit :

- *Pour chaque opération i de l'ordre concerné*
- *Pour chaque machine k de l'ensemble des machines disponibles.*
 - *Rechercher une possibilité d'insertion vérifiant la non préemption,*
 - *Calculer le coût de cette opération en incluant les décalages occasionnés,*
 - *Si opération à $t - 1$ différente de l'opération à t alors décaler à droite*
 - *Sinon $t = t + 1$*
- *Fin pour*
- *Insérer l'opération i sur la machine k où le critère est le plus petit.*
- *Décaler à droite les prochaines opérations ordonnancées si nécessaire*
- *Fin pour*

b) Ré-ordonnement complet

Nous pouvons être amenés à revoir la totalité de l'ordonnement à partir d'une certaine date $t=t_0$, ceci est particulièrement vrai dans le cas où des ordres prévisionnels deviennent fermes. Le but étant de proposer une nouvelle solution pour la totalité des opérations non encore effectuées (celles qui ont été fermes et celles qui le sont devenues). Ce ré-ordonnement peut s'effectuer soit à l'aide des règles de priorités comme la règle ECT, soit par les algorithmes génétiques en optimisant les mêmes critères que précédemment. Dans ce cas, et contrairement au cas statique, nous considérons la totalité des ordres (ordres fermes initiaux augmentés des ordres qui avaient le statut de prévisionnels initialement). La solution sera complètement modifiée à l'exception des opérations déjà exécutées et en cours d'exécution [CA/04/14]. [BER, 05].

Rappelons que ces méthodes d'insertion doivent permettre l'obtention d'une solution (ordonnement) réalisable en optimisant deux critères ; le Makespan et le profit. Pour cela une optimisation multi-critère s'impose, je ne vais pas détailler cette partie car elle l'a été suffisamment dans le paragraphe 3.2.5 du chapitre précédent. Nous avons utilisé la même méthode que dans les problèmes de transport, à savoir la méthode de recherche dynamique. En effet, cette méthode permet d'aider le décideur quand il ne peut pas avoir une préférence marquée d'un critère par rapport à l'autre. Cette démarche est détaillée et appliquée avec succès dans les travaux de BERKOUNE, attestés par plusieurs publications comme [RI/06/5] [RI/07/6]

2.3 Calcul de bornes inférieures

Le calcul de bornes inférieures est motivé par le fait que nous devons trouver une solution "optimale" pour des problèmes classés NP-difficiles comme il a été mentionné plus haut. Il est clair que nous sommes amenés à démontrer l'efficacité des approches de résolution que nous proposons ; pouvoir affirmer par exemple que le critère étudié est optimal ou quasi

optimal. Pour cela, On s'est attaché dans les travaux de thèse de BERKOUNE, de proposer une démarche pour le calcul de bornes inférieures pour les deux principaux critères que nous avons considérés à savoir le makespan et le profit. Rappelons au passage que les méthodes proposées dans la littérature pour le traitement des problèmes à une machine [JOU 02], des problèmes à machines parallèles [JUR 92] [CAR 87], des problèmes *flow-shop* hybrides [BIL 01] et des problèmes du type *job-shop* [CAR 89] [KAC 03], se basent généralement sur le principe de la relaxation de contraintes (préemption des tâches, contraintes disjonctives sur les ressources, etc.). Notre but consiste à mettre en place une méthodologie d'évaluation des qualités et des performances du système de production en calculant les valeurs limites pour les critères considérés (le coût de production et le makespan). Nous allons calculer deux bornes inférieures pour les ordres fermes pour les deux critères cités plus haut et également deux bornes inférieures pour les ordres prévisionnels.

a) Borne inférieure du makespan des demandes fermes

La minoration du critère makespan pour les demandes fermes se calcule par les méthodes classiques développées par Carlier [CAR 89] et utilisées par Kacem dans le problème du job shop flexible [KAC 03]. Nous avons utilisé dans les travaux de BERKOUNE les mêmes méthodes pour le calcul de la borne inférieure du makespan pour les ordres fermes [RI/06/5] [BER 05] cette borne est donnée par l'équation suivante :

$$C_{f \max}^1 = \max_{1 \leq j \leq n} \left(r_j + \sum_{i=1}^{n_j} \gamma_{ij} \right) \quad (2.8)$$

où γ_{ij} est la plus petite durée opératoire de l'opération O_{ij} , et r_j la plus petite date de disponibilité l'ordre de fabrication j

Il faut remarquer que dans le cas où le cardinal de l'ensemble des ordres de fabrication J est supérieur au nombre de machines ou dans le cas de la relaxation de certaines contraintes (préemption des tâches, contraintes disjonctives sur les ressources...), il n'y a pas de solution qui atteigne la borne inférieure représentée par l'équation 2.8. Dans ce cas, la borne inférieure dépend du nombre de machines, elle devient :

$$C_{f \max}^2 = \frac{1}{M} \left(\sum_{k=1}^M r'_k + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{n_j} \gamma_{ij} \right) \quad (2.9)$$

Avec r'_k le plus petite date de disponibilité de la machine k .

Ce qui nous conduit à définir une borne inférieure du makespan pour les ordres fermes par l'équation suivante :

$$C_{f \max}^* = \max \left(\frac{1}{M} \left(\sum_{k=1}^M r'_k + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{n_j} \gamma_{ij} \right), \max_{1 \leq j \leq n} \left(r_j + \sum_{i=1}^{n_j} \gamma_{ij} \right) \right) \quad (2.10)$$

b) Borne inférieure du makespan des demandes prévisionnelles

Le problème de la détermination d'un minorant pour ce critère dans le cas des demandes incertaines est assez délicat. En effet, nous n'avons pas trouvé dans la littérature d'étude assez fiable dans la matière. Néanmoins, nous avons pris l'initiative avec Djamel BERKOUNE dans le cadre de sa thèse [BER 05] [RI/06/5] de calculer cette borne en fonction

des plus petites dates d'insertion dans les disponibilités machines restantes après ordonnancement des ordres fermes et des durées d'exécution initiales (p_{ijk}). Ce qui nous a conduit à l'équation ci dessous qui représente une borne inférieure pour les ordres prévisionnels.

$$C_{pmax^*} = \max_{n+1 \leq j \leq N} \left(\sum_{i=1}^{n_j} \min_{1 \leq k \leq M} \left(p_{ijk} + \left(\min(\mathcal{R}_k) - \sum_{x=1}^{i-1} \gamma'_{x-1,j} \right) \right) \right) \quad (2.11)$$

p_{ijk} représente la durée opératoire de l'opération O_{ij} sur la machine k et \mathcal{R}_k , l'ensemble des possibilités de dates d'insertion sur la même machine k .

c) Borne inférieure du coût de fabrication des demandes fermes

Nous voulons à travers cette partie pouvoir déterminer un coût au delà du quel la solution ne sera pas viable. Ce coût est donné par l'équation suivante :

$$C_{ferme}^* = \left(\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{n_j} \min_k (p_{ijk} \cdot CM_k) + \sum_{j=1}^n MP_j + \sum_{k=1}^M \beta_k L_k \right) \quad (2.12)$$

où β_k représente le coefficient d'utilisation de la machine k , et $\beta_k L_k$ indique le coût de lancement de la machine k .

d) Borne inférieure du coût de fabrication des demandes prévisionnelles

On considère que les ordres prévisionnels sont insérés dans une solution réelle (solution des ordres fermes) qui a un coût C_{ferme} . La borne inférieure du coût de production est alors :

$$C_{prevision}^* = \left(\sum_{j=n+1}^N \sum_{i=1}^{n_j} \min_k (p_{ijk} \cdot CM_k) + \sum_{j=n+1}^N MP_j + C_{ferme} \right) \quad (2.13)$$

3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les travaux de recherche de Djamel BERKOUNE menés dans le cadre de la préparation de sa thèse que j'ai co-dirigé avec le professeur RABENASOLO. Ces travaux se sont focalisés sur les problèmes d'ordonnancement des ateliers de type job-shop flexible assujettis à des demandes prévisionnelles.

En effet, de part ses travaux, nous avons apporté des solutions à des problèmes souvent restés sans réponse. Rappelons que les demandes incertaines ou prévisionnelles peuvent être des commandes supplémentaires, des anticipations de production, des demandes urgentes ou même des opérations de maintenance. L'idée de base consistait non pas à refaire un ordonnancement de la totalité des ordres de fabrications (fermes et prévisionnels) mais plutôt de trouver en premier lieu une solution pour les demandes fermes puis d'intégrer les demandes prévisionnelles dans les solutions trouvées en optimisant un ou plusieurs critères. Ce faisant, pour les demandes fermes, la méthode s'articulait autour de deux modules :

- le premier permettait la construction des solutions en utilisant les algorithmes génétiques en optimisant les deux critères concernés (le makespan et le coût de production).

- Le second module concernait la mesure de la qualité de la solution produite. Cette notion intègre des préférences subjectives, elle peut chercher à identifier les solutions dominantes (au sens de Pareto) on se basant sur une appréciation de la qualité de la solution à travers le calcul des bornes inférieures pour les critères considérés.

Pour les demandes prévisionnelles, l'objectif consistait à intégrer ces dernières dans les solutions des ordres fermes pour cela, deux méthodes ont été proposées :

- Une méthode statique, permet, une fois l'ordonnancement des ordres fermes effectué, d'insérer les demandes prévisionnelles dans les disponibilités des machines et éventuellement d'élargir celles-ci si elles ne sont pas suffisantes et cela à condition d'être en adéquation avec le ou les critères à optimiser.
- Une méthode dynamique plus élaborée, qui permet d'effectuer un ré-ordonnancement partiel au fur et à mesure des changements des caractéristiques des demandes (émergence des ordres urgents par exemple). Ceci aura pour conséquence la modification de l'ordonnancement initial. Rappelons qu'un ré-ordonnancement complet est possible mais uniquement dans le cas où certains ordres incertains devient fermes (ordonnancement des ordres fermes uniquement).

Rappelons également que nous optimisons au moins deux critères, l'approche multi-objectif a été étudiée. Elle permet d'apporter une aide appréciable au décideur qui ne peut pas, ou ne veut pas prendre une décision particulière privilégiant un critère sur l'autre. La qualité des solutions proposées est évaluée à travers le calcul des bornes inférieures pour les critères à optimiser pour les ordres fermes et également pour les ordres prévisionnels.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Après ce tour d'horizon des travaux que nous avons menés et co-dirigés au sein du LAGIS, Nous allons dresser un bilan de ces activités de recherche.

Il est à notre que notre domaine de prédilection était la résolution et l'optimisation des problèmes de production manufacturière, puis nous avons élargi notre spectre aux problèmes de régulation des transports urbains vu les aspects commun entre ses deux catégories de problèmes. Et c'est tout naturellement que nous nous intéressons actuellement aux problèmes plus généraux englobant les deux parties (même si le cas du transport ne concerne plus les transports urbains), le management des chaînes logistiques.

Rappelons qu'un très grand nombre de problèmes liés aux systèmes de production flexibles sont considérés comme très difficile à résoudre. Il est donc nécessaire à la fois de contribuer à réduire cette complexité et de proposer des outils de résolution et d'optimisation passant outre cette difficulté. Les méthodes de soft computing et plus particulièrement les algorithmes génétiques nous ont beaucoup aidés à apporter des solutions de très bonnes qualités. Il est vrai que les activités des entreprises ont été très profondément modifiées ces dernières années principalement dus aux développements des moyens de communication, de la mondialisation, et de la modification du comportement des consommateurs. Ce contexte leurs impose des délais de plus en plus serrés et des demandes de plus en plus irrégulières qui ne leurs permettent plus d'anticiper la production. Dans cet environnement incertain, il est important d'organiser le travail prévu sur les ressources disponibles, d'intégrer dans cette organisation les commandes incertaines et urgentes, et à partir de la, être capables de faire un ordonnancement prévisionnel et d'en extraire une évaluation des délais de fabrication afin de finaliser les commandes en cours. Ceci implique inévitablement une prise de risque importante conduisant à une perte totale ou partielle des commandes non vendues. Les travaux effectués par Djamel BERKOUNE avaient pour objectif de développer une méthode de résolution et d'optimisation des problèmes de type job shop flexible intégrant les demandes prévisionnelles. L'utilisation des algorithmes génétiques ainsi que des heuristiques spécifiques pour le placement des demandes prévisionnelles s'est avérée payante et a conduit à l'obtention de solutions très satisfaisantes. Le calcul des bornes inférieures s'est avéré d'un grand secours pour attester de la bonne qualité des résultats surtout ceux concernant les demandes prévisionnelles où nous avons contribué à proposer une démarche efficace pour le calcul de cette borne.

Rappelons également que les problèmes d'ordonnancement nécessitent souvent la prise en compte de plusieurs critères. Nous avons abordé dans ce travail l'approche multi-objectif afin d'optimiser deux critères (le coût de production le makespan). L'approche utilisée est basée sur la notion de Pareto dominance dans laquelle on utilise une règle floue pour calculer dynamiquement les poids. Le travail de recherche ainsi réalisé a conduit à de nombreuses publications dans des revues scientifiques internationales et dans des congrès internationaux.

Parallèlement à ce travail, je me suis intéressé également à la régulation des systèmes de transport urbain dans le cadre du GRRT. En effet, la prise de conscience globale sur les effets de plus en plus indésirables tant sur le plan environnemental que sur le plan de fluidité de circulation impliquant les déplacements individuels (voiture), a conduit à encourager

l'utilisation des réseaux de transports urbains les rendant ainsi de plus en plus indispensables dans la vie des citoyens.

Néanmoins, ces systèmes sont soumis à des phénomènes aléatoires qui peuvent altérer leur fonctionnement et par conséquent provoquent une insatisfaction de la part des usagers. Il devient nécessaire de gérer le trafic pour faire face à cette dégradation de la qualité du service offert. Les travaux de thèse de Mahjoub DRIDI menés dans ce domaine concernent la régulation du trafic au sein d'un réseau de transport multimodal. Le but était de concevoir un système d'aide à la décision (S.A.D) capable de surveiller le fonctionnement global du trafic en anticipant les différentes perturbations qui peuvent altérer son fonctionnement, et en fournissant des propositions de décisions pertinentes afin de rétablir le service nominal. Afin de pouvoir atteindre cet objectif, nous avons mis en place un modèle basé sur les réseaux de Petri colorés orientés objets permettant de reproduire le plus fidèlement possible le comportement du système réel, afin de tester et de valider les décisions prises par le régulateur. Ces décisions sont prises en fonction d'un certain nombre de critères que nous avons mis au point, il s'agit de la ponctualité, de la régularité et de la garantie de correspondance. Nous avons proposé une approche de résolution basée sur les algorithmes génétiques en développant un nouveau codage ainsi que de nouveaux opérateurs génétiques (croisement et mutation). Cette démarche était couplée à une optimisation multicritère dynamique utilisant le principe de la logique floue basé sur la notion de Pareto dominance s'affranchissant ainsi du choix d'un critère sur l'autre. Les résultats obtenus à la suite de ces travaux de recherche ont été très fructueux, et ont fait également l'objet de plusieurs publications dans des journaux et dans des congrès scientifiques mondiaux.

La thèse que nous codirigeons actuellement nous permet de s'intéresser à un problème plus complet que ceux déjà traités. En effet, le problème de management de chaîne logistique englobe plusieurs problèmes. Nous retrouvons dans ce cadre un ensemble de problèmes concernant l'approvisionnement, la production et la distribution pour lesquels il faut trouver une solution satisfaisante, voir optimale. Notre objectif est d'adapter et d'appliquer les techniques et méthodes utilisées pour la résolution des problèmes précédents pour résoudre ce problème d'une façon globale. La résolution globale nous permettra de prévoir des solutions optimisant le stockage des matières premières et des produits finis, de pouvoir anticiper des commandes, et donc de pouvoir organiser la production avec la maîtrise de tout un ensemble d'éléments appartenant à cette chaîne.

Plusieurs voies et perspectives potentielles de recherche s'offrent à nous dans le cadre de travaux futurs. Parmi les axes que nous souhaitons développer, nous pouvons citer :

Etendre l'étude des problèmes de la gestion de production avec des demandes incertaines, aux problèmes dynamiques d'allocation et de localisation des ressources stratégiques et intégrer l'aspect stochastique dans la modélisation du problème. Il serait intéressant de coupler nos techniques basées principalement sur les algorithmes génétiques avec d'autres techniques comme la recherche tabou, les colonies de fourmis et la logique floue, et d'élargir l'étude aux problèmes de gestion des urgences, de planification et d'affectation des ressources (humaines, matérielles, et financières) dans le milieu hospitalier, d'appliquer ces techniques à l'établissement des plans de marche prévisionnels dans les systèmes de transport urbain.

Etendre le codage proposé dans le cadre de la régulation de transport urbain pour prendre en compte d'autres types de décisions de régulation comme l'injection de véhicules, transbordement, etc.

Pouvoir implémenter nos algorithmes pour la régulation des transports urbains dans un système réel afin de mesurer l'impact des décisions proposées sur la qualité de service offert aux usagers et tester ainsi les limites pratiques de l'approche.

D'un autre côté, l'utilisation des algorithmes génétiques pour la résolution des problèmes combinatoires comme ceux que nous traitons nous conduit à proposer des codages spécifiques aux problèmes traités. Ces codages n'ont pas fait l'objet d'étude théorique sur leur convergence à l'instar du codage traditionnel (binaire), nous aimerions proposer des fondements théoriques équivalents à la notion de schéma du codage binaire.

Nous continuerons à développer nos recherches fondamentales, principalement dans la mise en place de nouveaux outils permettant la résolution des nombreux problèmes qui se posent encore à l'industrie lorsque l'on considère des problèmes complexes et/ou incertains, comme ceux que nous rencontrons dans le management de la chaîne logistique, et à envisager des solutions optimisant les performances, la sécurité et les coûts de production.

BIBLIOGRAPHIE GENERALE

- [ALL 89] H. Alla, R. David
"Du grafctet aux réseaux de Pétri"
Editions Hermès, 1989
- [ALO 99] M.A. Aloulou
"Application des algorithmes génétiques à la régulation du trafic des bus"
Rapport de DEA, UST Lille, 1999
- [ARA 84] S. Araya, S. Sone
"Traffic dynamics of automated transit systems with preestablished schedules"
IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 14, No. 4, pp. 677-687, 1984
- [ART 03] C. Artigues, P. Michelon, S. Reusser
"Insertion techniques for static and dynamic resource constrained project scheduling"
European Journal of Operational Research, Vol. 149, No. 2, pp. 249-267, 2003
- [BAL 00] F. Balbo
"ESAC : un modèle d'interactions multi-agent utilisant l'environnement comme Support Actif de Communication : application à la gestion des transports urbains"
Thèse, Université de Paris IX Dauphine, 2000
- [BAS 02] L. BASIC, N. Rozic, D. Begusic
"Modeling Real Time Streaming Protocol using Petri nets"
Int. conf. SoftCOM, Venice, pp.199-213 2002
- [BER 04] S. Bertel, J.C. Billat
"A genetic algorithm for an industrial multiprocessor flowshop scheduling problem with recirculation"
European Journal of Operational Research, Vol. 159, No. 3, pp. 651-662, 2004
- [BER 05] D. Berkoune
"Optimisation de l'ordonnancement prenant en compte les tâches prévisionnelles"
Thèse, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2005
- [BIE 02] M. Bielli, M. Caramia, P. Carotenuto
"Genetic algorithms in bus network optimization"
Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 10, No. 1, pp. 19-34, 2002
- [BIL 01] J. C. Billaut, J. Carlier, E. Néron, A. Olivier
"Ordonnancement d'ateliers à ressources multiples"
Ordonnancement de la production, Chapitre 10, P. Lopez & F. Roubellat (Eds.), pp 259-329, Editions Hermès Science, Paris, 2001

- [BOM 92] F.A Bomarius
"Multiagent approach towards modeling urban traffic scenarios"
Research Report. RR-92-47, DFKI-GmbH, Allemagne, 1992
- [BOR 02] P. Borne, B. Fayech, S. Hammadi, S. Maouche
"Decision support system for urban transportation networks"
IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C, Vol. 33, No. 1,
pp. 67-77, 2003
- [BOX 76] G.E.P. Box, G.M. Jenkins
"Time Series Analysis: Forecasting and Control"
Holden Day, San Francisco, 2^{ème} edition, 1976
- [BRO 62] R.G. Brown
"Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series"
Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1962
- [BUR 00] E. K. Burke, A.J. Smith
"Hybrid Evolutionary Techniques for the Maintenance Scheduling Problem"
IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15 No. 1, pp. 122-128, 2000
- [CAR 87] J. Carlier
"Scheduling jobs with release dates and tails on identical machines to minimize
Makespan"
European Journal of Operational Research, Vol. 29, No.3, pp. 298-306, 1987
- [CAR 88] J. Carlier, P. Chretienne
"Problèmes d'ordonnancement modélisation/complexité/Algorithmes"
Edition Masson, Paris, 1988
- [CAR 89] J. Carlier, E. Pinson
"An algorithm for solving the Job-shop problem"
Management Science, Vol. 35, No.2, pp. 164-176, 1989
- [CHA 95] P. Chakraborty, K. Deb, P. S. Subrahmanyam
"Optimal scheduling of transit systems using genetic algorithms"
Journal of Transportation Engineering, Vol. 121, No. 6, pp. 544-552, 1995
- [CHU 96] C. Chu, J.M Proth
"L'ordonnancement et ses applications"
Edition Masson, Paris, 1995
- [COL 02] Y. Collette, P. Siarry
"Optimisation multiobjectif"
Editions Eyrolles, 2002
- [DAV 91] L. Davics
"Handbook of genetic algorithm"
Edition Van Nostrand Reinhold, New York, 1991

- [DAV 00a] A. David, V. Veldhuizen, B. G. Lamont
"Multiobjective Evolutionary Algorithms Analyzing the State-of-the-Art"
Evolutionary Computation, Vol. 8, No. 2, pp 125-147, 2000
- [DAV 00b] A.J. Davenport, J.C. Beck
"A survey of techniques for scheduling with uncertainty"
Disponible sur : <http://www.eil.utoronto.ca/profiles/chris/gz/uncertainty-survey.ps>, 2000
- [DEB 98] K. Deb, P. Chakroborty
"Time scheduling of transit systems with transfer considerations using genetic algorithms"
Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 1, pp. 1-24, 1998
- [DEB 01] K. Deb
"Nonlinear goal programming using multiobjective"
Journal of the Operational Research Society, Vol. 52, No. 3, pp. 291-302, 2001
- [DEL 95] F. Della Croce, R. Tadei, G. Volta
"A genetic algorithm for the job shop problem"
Computer and Operations Research, Vol.22, No. 1, pp. 15-24, 1995
- [DI F 04] A. Di Febbraro, D. Giglio, N. Sacco
"Urban Traffic Control Structure Based on Hybrid Petri Nets"
IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 224-237, 2004
- [DOT 06] M. DOTOLI; M.P. FANTI
"An urban traffic network model via coloured timed Petri nets"
Control engineering practice, Vol. 14, No. 10, pp.1213-1229, 2006
- [DRI 04] M. DRIDI
"Contribution à la résolution des problèmes de régulation dans les systèmes de transport dans un contexte multicritère par approche évolutionniste"
Thèse, E. C. Lille, 2004
- [DUB 01] D. Dubois, H. Fargier, P. Fortemps
"Ordonnement sous contraintes flexibles et données incertaines : l'approche floue"
Ordonnement de la production, Chapitre 12, P. Lopez & F. Roubellat (Eds.), pp. 361-391, Editions Hermès Science, Paris, 2001
- [ESQ 01] P. Esquirol, P. Lopez
"Concepts et méthodes de base en ordonnancement de la production"
Ordonnement de la production, Chapitre 2, P. Lopez & F. Roubellat (Eds.), pp. 25-53, Edition Hermès, Paris, 2001
- [FAY 01] B. Fayeche, S. Hammadi, S. Maouche
"Urbain bus traffic regulation by evolutionary algorithms"
IEEE/SMC'01, Tucson, pp. 1316-1322, 2001

- [FAY 03] B. Fayech
"Régulation des réseaux de transport multimodal : Systèmes multi-agents et algorithmes évolutionnistes"
Thèse, UST Lille, 2003
- [FER 95] Jacques Ferber
"Les systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective"
InterEditions, Paris, 1995
- [FIO 99] A. Fiordaliso
"Systèmes flous et prévision de séries temporelles"
Editions Hermès Sciences, 1999
- [FON 95] C.M. Fonseca et P.J. Fleming
"An Overview of Evolutionary Algorithms in Multiobjective Optimization"
Evolutionary Computation, Vol. 3, No. 1, pp. 1-16, 1995
- [FON 98] C.M. Fonseca, P.J. Fleming
"Multiobjective Optimization and Multiple Constraint Handling with Evolutionary Algorithms-Part I: A Unified Formulation"
IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A, Vol. 28, No. 1, pp 26-37, 1998
- [GAR 79] M.R. Garey and D.S. Johnson
"Computer and intractability: a guide to the theory of NP-Completeness"
Edition W.H. Freeman & Co Ltd, San Francisco, 1979
- [GHE 94] F. Ghedjati-Guessoum
"Résolution par des heuristiques dynamiques et des algorithmes génétiques du problème d'ordonnancement de type job-shop généralisé"
Thèse, Université Paris 6, 1994
- [GOL 89] D.E. Goldberg
"Genetic algorithms in search, optimisation and machine learning"
Edition Addison-Wesley, Sydney, 1989
- [GRE 97] S. Green, L. Hurst, B. Nangle, P. Cunningham, F. Somers, R. Evans
"Software agents: A review"
Tech. Rep, TCS-CS-1997-06, Trinity College Dublin, Broadcom Éireann Research Ltd., 1997
- [GZA 01] M. Gzara
"Méthode cooperative d'aide multicritère à l'ordonnancement flou"
Thèse, E.C. Lille et UST Lille, 2001
- [HAG 02] A. Haghani, M. Banihashemi
"Heuristic approaches for solving large-scale bus transit vehicle scheduling problem with route time constraints"
Transportation Research, Part A, Vol. 36, No. 4, pp. 309-333, 2002

- [HAL 01] R. Hall, M. Dessouky, Q. Lu
 "Optimal holding times at transfer stations"
 Computers & Industrial Engineering, Vol. 40, No. 4, pp. 379-397, 2001
- [HAM 91] S. Hammadi
 "Une méthode d'ordonnancement minimisant les temps d'attente et de transit dans les systèmes de production flexibles de type job shop"
 Thèse, UST Lille, 1991
- [HAM 03] S. Hammami, A. Hadj Alouane, A. Jebali, P. Ladet
 "Approche Multi-objectif pour l'introduction de l'urgence dans le programme opératoire"
 5^{ème} Congrès International de Génie Industriel, Québec, 2003
- [HAY 97] S. Hayat, S. Maouche
 "Régulation du trafic des autobus, Amélioration de la qualité des correspondances"
 Rapport intermédiaire, convention ESTAS-I3D, Octobre 1997
- [HER 01] J.Z. Hernandez, S. Ossowski, A. Garcia-Serrano
 "On Multi agent coordination architectures: A traffic management case study "
 IEEE-ICSS' 01, Hawaii, 2001
- [HOL 92] J.H. Holland
 "Adaptation in natural and artificial systems"
 Edition MIT press Bradford Books, 2^{ème} édition 1992
- [HWA 79] C.L. Hwang, A.S.M. Masud
 "Multiple objective decision making Methods and application"
 Springer-Verlag, 1979
- [ISH 98] H. Ishibuchi, T. Murata
 "A multiobjective genetic local search algorithm and its application to flowshop scheduling"
 IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics- Part C, Vol. 28, No. 3, pp. 392-403, 1998
- [JEB 03] A. Jebali, P. Ladet, A. Hadj Alouane
 "Une approche heuristique pour la construction du programme opératoire"
 5^{ème} Congrès International de Génie Industriel, Québec, 2003
- [JOU 02] A. Jouglet, P. Baptiste, J. Carlier
 "Exact procedures for single machine total cost scheduling"
 IEEE/SMC'02, Hammamet, 2002
- [JUR 92] B. Jurisch
 "Scheduling job-shops with multi-purpose machines"
 PhD Thesis, Universitat Osmabruck, Allemagne, 1992

- [KAC 03] I. Kacem
 "Ordonnancement multicritères des job-shops flexibles : formulation, bornes inférieures et approche évolutionniste coopérative"
 Thèse, UST Lille, 2003
- [KEL 99] H. Kellerer, T. Tautenhahn G. J. Woeginger
 "Approximability and nonapproximability results for minimizing total flow time on a single machine"
 Society for Industrial and Applied Mathematics Journal of Computing, Vol. 28, No. 4, pp. 1155-1166, 1999
- [KID 98] F.A. Kidwai
 "Optimal design of bus transit network: A genetic algorithm based approach"
 PhD Thesis, I.I.T. Kanpur, India, 1998
- [KWA 99] A.S.K. Kwan, R.S.K. Kwan, A. Wren
 "Driver scheduling using Genetic Algorithms with embedded combinatorial traits"
 Computer-Aided Transit Scheduling, in Wilson, N.H.M, Springer-Verlag, pp. 81-102, 1999
- [LAI 02] H. Laichour
 "Modélisation multi-agents et aide à la décision : application à la régulation des correspondances dans les réseaux de transport urbain"
 Thèse, UST Lille, 2002
- [LI 91] Y. Li, J.M. Rousseau, M. Gendreau
 "Real Time Scheduling on a Transit Bus Route: A 0-1 Stochastic Programming Model"
 Transportation Research Forum (TRF'91), New Orleans, pp. 157-166, 1991
- [LI 05] L. Li, L. Wei-Hua, L. Hongchao
 "Traffic Signal Priority/Preemption Control with Colored Petri Nets"
 IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems, Vienna, 2005
- [LIN 04] X. Lin, S.L. Janak, C. A. Floudas
 "A new robust optimization approach for scheduling under uncertainty: I. Bounded uncertainty"
 Computers and Chemical Engineering, Vol. 28, No. 6-7, pp. 1069-1085, 2004
- [LIO 98] N. Liouane
 "Contribution à l'élaboration d'un outil d'aide à la décision pour l'ordonnancement de production en environnement incertain"
 Thèse, UST Lille, 1998
- [LJU 92] M. Ljunberg, A. Lucas
 "The oasis air-traffic management system"
 Int. Conf. on Artificial Intelligence, PRICAI 92, Seoul, 1992

- [MAN 97] K.F.Man, K.S.Tang, S.Kwong, W.A.Halang
"Genetic algorithms for control and signal processing"
Edition Springer-Verlag, Londre, 1997
- [MAR 98] S.G. Makridakis, S.C. Wheelwright, R.J. Hyndman
"Forecasting: Methods and Applications"
Edition John Wiley & Sons, New York, 3^{ème} edition, 1998
- [MAT 04] D.C. Mattfeld, C. Beirwirth
"An efficient genetic algorithm for job-shop scheduling with tardiness objectives"
European Journal of Operational Research, Vol. 155, No.3, pp. 616-630, 2004
- [MES 95] K. Mesghouni
"Application des algorithmes génétiques à la commande des MAS"
Rapport de DEA, E.C. Lyon, 1995
- [MES 99] K. Mesghouni
"Application des algorithmes évolutionnistes dans les problèmes d'optimisation en ordonnancement de la production"
Thèse, UST Lille, 1999
- [MIC 92] Z.Michalewicz
"Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution programs"
Edition Springer -Verlag, Berlin, 1992
- [MOH 98] S.B.Mohan, V.M. Tom
"Urban bus transit route network design using genetic algorithm"
Journal of Transportation Engineering, Vol. 124, No. 4, pp 368-375, 1998
- [MUR 98] S. Muralidhar, S. L. Dhingra, K.V. Krishna Rao
"Public transport routing and scheduling using genetic algorithm"
Workshop TPMDC, IIT Bombay, pp. 91-102, 1998
- [MUR 89] T. Murata
"Petri nets: Properties, analysis and applications"
Proc. IEEE, Vol. 77, No. 4, pp. 541-580, 1989
- [NAC 97] K. Nachtigall, S. Voget
"Minimizing waiting times in integrated fixed interval timetables by upgrading railway tracks"
European Journal of Operational Research, Vol. 103, No. 3, pp. 610-627, 1997
- [NAI 02] A. Nait Sidi Moh, M.A. Manier, A. El Moudni
"A controlled policy for public transport network modelled by Petri Nets and Max-Plus Algebra"
WAC, ISIAC028, Orlando, 2002

- [NGA 00] S. Ngamchai, D.J. Lovell
 "Optimal time transfer in bus transit route network design using genetic algorithms"
 Computer Aided Scheduling of Public Transportation, Berlin, 2000
- [NGA 03] S. Ngamchai, D.J. Lovell
 "Optimal time transfer in bus transit route network design using genetic algorithms"
 Journal of Transportation Engineering, vol. 129, No. 5, pp.510-521, 2003
- [PLA 98] M.F. Plaquin
 "Contribution des algorithmes évolutionnistes à la constitution d'îlots de fabrication"
 Thèse, Université Balaise Pascal-Clermont II, 19 janvier 1998
- [PON 01] S.G. Ponnambalam, P. Aravindan and P. Sreenivasa Rao
 "Comparative evaluation of genetic algorithms for job-shop scheduling"
 Production Planning & Control, Vol. 12, N° 6, pp. 560-574, 2001
- [PON 04] P. Pongcharoen, C. Hicks, P.M. Braiden
 "The development of genetic algorithms for the finite capacity scheduling of complex products, with multiple levels of product structure"
 European Journal of Operational Research, Vol. 152, No.1, pp. 215-225, 2004
- [POR 96] M.C. Portmann
 "Genetic Algorithms and scheduling: State of the art and some propositions"
 Workshop of Production Planning and Control, Mons, Belgium, 1996
- [REN 95] J.M. Rendres
 "Algorithmes génétiques et réseaux de neurones"
 Edition Hermès, Paris, 1995
- [SAL 97] V. Salim, X. Cai
 "A genetic algorithm for railway scheduling with environmental considerations"
 Environmental Modelling and software, Vol.12, No. 4, pp.301-309, 1997
- [SIB 93] C. Sibertin-Blanc
 "The object-oriented approach and Petri nets for the modelling of information system's behaviour"
 Workshop on Comp. Supp. Coop. Work, Petri Nets, and Related Formalisms, Chicago, pp. 99-107, 1993
- [SIB 94] C. Sibertin-Blanc
 "Cooperative Nets"
 15th Int. Conf. on Application and theory of Petri Net, Saragossa, 1994

- [SIL 89] M. Silva; R. Vallet
 "Petri nets and flexible manufacturing"
 in advance in Petri nets, Lecture notes in Computer Science 424, Springer
 Verlag, pp. 374-417, New-York, 1989
- [SOU 00] B. Saussol, S. Maouche, S. Hayat, A. Dekokere, A. Dumont
 "Elaboration et mise au point d'un système d'aide à la décision pour la gestion
 du réseau de transport collectif de Montbéliard"
 Rapport d'étape INRETS-I3D-LAIL, juin 2000
- [SRI 95] N. Srinivas, K. Deb
 "Multiobjective optimisation using non-dominated sorting in genetic
 algorithms"
 Evolutionary Computation Vol. 2 No.3, pp. 221-248, 1994
- [SYC 98] K.P. Sycara
 "Multi-agent systems"
 AI Magazine, Vol. 19, No. 2, pp. 79-92, 1998
- [TAL 99] E-G. Talbi
 "Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire multi-objectif : Etat de
 l'art"
 Rapport C.N.E.T, octobre 1999
- [TAN 01] K.C. Tan, L.H. Lee, K.Q. Zh, K. Ou
 "Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows"
 Artificial Intelligence in Engineering, Vol. 15, No. 3, pp.281-295, 2001
- [T'KI 99] V. T'Kindt
 "Etude des problèmes d'ordonnancement multicritères"
 Thèse, Université François Rabelais Tours, 1999
- [TOL 01] C. Tolba; D. Lefebvre; P. Thomas and A. ElMoudni
 "Continuous Petri nets models for the analysis of traffic urban networks"
 IEEE SMC '01, Arizona, pp. 1323-1328, 2001
- [TOL 05] C. Tolba; P. Thomas; D. Lefebvre and A. ElMoudni
 "Crossroad traffic lights control based on Petri nets models"
 IMACS, Paris, 2005
- [TOD 97] D.S. Todd, P. Sen
 "A multiple criteria genetic algorithm for container loading"
 7th Int. Conf. on Genetic Algorithms, Michigan, pp. 674-681, 1997
- [TON 89] Y. Tong
 "Inequalities for a Class of Positively Dependent Random Variables with a
 Common Marginal"
 The Annals of Statistics, Vol. 17, No. 1, pp. 429-435, 1989

- [WIN 60] P.R. Winters
"Forecasting sales by exponentially weighted moving averages"
Management Science, Vol. 6, pp. 324-342, 1960
- [XIO 92] K Y. Xiong, J.B. Schneider
"Transportation network design using a cumulative genetic algorithm and neural network"
Transportation Research Record-1364, Washington D.C, pp. 37-44, 1992
- [YAM 92] T. Yamada, R. Nakano
"A Genetic Algorithm Applicable to Large-Scale Job-Shop Problems"
Parallel Problem Solving from Nature, Vol. 2, pp. 281-44, 1992
- [ZHA 99] G. Zhang, M.Y. Hu, B. E. Patuwo, D.C. Indro
"Artificial neural networks in bankruptcy prediction: General framework and cross-validation analysis"
European journal of operational research Vol. 116 No.1, pp. 16-32, 1999
- [ZHO 89] M. Zhou, K. Venkatesh
"Modeling, Simulation, and Control of Flexible manufacturing systems, a Petri net approach"
Series in Intelligent Control and Intelligent Automation, Vol. 6, World Scientific Publishing Company, 1999

BIBLIOGRAPHIE PERSONNELLE

Thèse de Doctorat

"Application des Algorithmes Evolutionnistes dans les problèmes d'optimisation en ordonnancement de la production"

Thèse soutenue le 5 Janvier 1999 devant le jury d'examen composé de :

Président	J.G. GENTINA	Prof. Ecole Centrale de Lille)
Rapporteurs	C. TAHON M.G. SINGH	Prof. Université de Valenciennes Prof. UMIST, Manchester, Royaume-Uni
Examineurs	R. SOENEN S. MAOUCHE S. HAYAT	Prof. Université de Valenciennes Prof. Université de Lille I Dr. HDR, INRETS-ESTAS
Directeur de thèse	P. BORNE	Prof. Ecole Centrale de Lille
Co-directeur	S. HAMMADI	Dr. Ecole Centrale de Lille.

Mémoire de DEA

"Application des algorithmes génétiques à la commande des Machines Asynchrone"
Juin 1995 Ecole Centrale de Lyon.

Revue scientifique internationale

- [RI/07/6] *"Resolution approach for multi objective problems with uncertain demands"*
European Journal of Operational Research, accepté sous presse, 2007
D. BERKOUNE, K. MESGHOUNI
- [RI/06/5] *"Lower bounds for the scheduling problem with uncertain demands"*
Int. J. of Applied mathematics and computer science, Vol. 16, No. 2, pp. 263-269, 2006
D. BERKOUNE, K. MESGHOUNI, B. RABENASOLO
- [RI/05/4] *"Traffic control in transportation systems"*
J. of Manufacturing Technology Management, Vol. 16, No. 1, pp. 53-74, 2007
M. DRIDI, K. MESGHOUNI, P. BORNE
- [RI/04/3] *"Evolutionary algorithms for job-shop scheduling"*
Int. J. of applied mathematics and computer science, Vol. 14, No. 1, pp. 91-103, 2004
K. MESGHOUNI, S. HAMMADI, P. BORNE
- [RI/99/2] *"Hybrid approach to decision making for job-shop scheduling"*
Production Planning & Control Journal, Vol. 10, No. 7, pp. 690-706, 1999
K. MESGHOUNI, P. PESIN, D. TRENTESAUX, S. HAMMADI, C. TAHON, P. BORNE
- [RI/98/1] *"On Modelling Genetic Algorithm for flexible job shop scheduling problem"*

Congrès internationaux avec comités de sélection et actes

- [CA/07/20] *"Scheduling problems under uncertain demand"*
Int. Conf. on Artificial Intelligence and Pattern Recognition (AIPR'07). Juillet 2007, Orlando, USA (CD-ROM)
D. BERKOUNE, K. MESGHOUNI
- [CA/07/19] *"Approche d'ordonnancement à temps réel en présence de panes de machines"*
Conf. Int. Francophone de Performance et Nouvelles Technologies en Maintenance (PENTOM'07), Juillet 2007, Mons, Belgique (CD-ROM).
D. BERKOUNE, K. MESGHOUNI
- [CA/06/18] *"Resolution approach for multiobjective scheduling problems with uncertain demand"*
CESA'06, Pékin, Chine, Octobre 2006 (CD-ROM).
D. BERKOUNE, K. MESGHOUNI, B. RABENASOLO
- [CA/05/17] *"Lower bounds and insertion methods in the flexible job shop scheduling"*
IMACS'05, Paris, France, Juillet 2005 (CD-ROM).
D. BERKOUNE, K. MESGHOUNI, B. RABENASOLO
- [CA/05/16] *"Ordonnancement et bornes inférieures de production prédictive"*
Conf. Int. Francophone de Performance et Nouvelles Technologies en Maintenance (PENTOM'05), Marrakech, Maroc, Vol. 6, pp. 453-462 Avril 2005
D. BERKOUNE, K. MESGHOUNI, B. RABENASOLO
- [CA/04/15] *"Approches évolutionnistes pour le problème d'ordonnancement prévisionnel"*
CIFA'04, Douz, Tunisie, Novembre 2004 (CD-ROM).
D. BERKOUNE, K. MESGHOUNI, B. RABENASOLO
- [CA/04/14] *"Insertion methods of uncertain demands in workshop scheduling"*
4th AUTEX World Textile Conf., Roubaix, France, Juin 2004 (CD-ROM)
D. BERKOUNE, K. MESGHOUNI, B. RABENASOLO
- [CA/04/13] *"Control of urban transportation systems: optimisation and vehicle scheduling"*
Combinatorial Optimisation Conference (CO'04), Lancaster, Royaume Uni, Mars 2004 (CD-ROM)
M. DRIDI, I. KACEM, K. MESGHOUNI, P. BORNE
- [CA/03/12] *"Public transport regulation using evolutionary algorithms"*
10th World Congress on Intelligent Transport Systems & Services (ITS'03), Madrid, Espagne, Novembre 2003 (CD-ROM)
M. DRIDI, K. MESGHOUNI, P. BORNE
- [CA/03/11] *"Modeling of a public transport network with colored and object Petri nets"*

CESA'03, Lille, France, Juillet 2003 (CD-ROM)
M. DRIDI, K. MESGHOUNI, P. BORNE

- [CA/02/10] *"Multi -period predictive production scheduling with uncertain demands"*
IEEE/SMC'02, Hammamet, Tunisie, Octobre 2002 (CD-ROM)
K. MESGHOUNI, B. RABENASOLO
- [CA/02/9] *"Regulation of a public transport network with consideration of the passenger flow: modeling of the system with High-level Petri Nets"*
IEEE/SMC'02, Hammamet, Tunisie, Octobre 2002 (CD-ROM)
E. CASTELAIN, .K. MESGHOUNI
- [CA/98/8] *"Traffic regulation modelling for a subway line with double loops"*
IEEE/SMC'98, San-Diego, U.S.A, Vol. 4, pp. 3261-3265, Octobre 1998
K. MESGHOUNI, S. HAYAT, S. HAMMADI, P. BORNE
- [CA/98/7] *"Les algorithmes à stratégie d'évolution pour la résolution des problèmes d'ordonnancement"*
FRANCORO II, Sousse, Tunisie, Avril 1998
K. MESGHOUNI, S. HAYAT, S. HAMMADI, P. BORNE
- [CA/98/6] *"Multi Crossover for Evolutionary Algorithms to solve scheduling problems"*
IEEE/IMACS'98, Hammamet, Tunisie, Vol. 3, pp. 437-442, Avril 1998
K. MESGHOUNI, S. HAMMADI
- [CA/97/5] *"Evolution programs for job-shop scheduling"*
IEEE/ SMC'97, Orlando, U.S.A, Vol. 1, pp. 720-725, Octobre 1997
K. MESGHOUNI, S. HAMMADI, P. BORNE
- [CA/97/4] *"Hybrid representation for genetic algorithm to solve flexible job shop scheduling"*
15th IMACS, Berlin, Allemagne, Vol. 5, pp. 433-438, Aout 1997
K. MESGHOUNI, S. HAMMADI, P. BORNE
- [CA/97/3] *"Nouvelle approche pour la résolution des problèmes d'ordonnancement du type job-shop flexible par les algorithmes génétiques"*
MOSIM'97, Rouen, France, pp. 33-41, Juin 1997
K. MESGHOUNI, S. HAMMADI, P. BORNE
- [CA/97/2] *"Parallel genetic operators for flexible job-shop scheduling"*
Int. Conf. on Eng Des & Aut, Bangkok, Thaïlande, pp. 626-630 Mars 1997
K. MESGHOUNI, S. HAMMADI, P. BORNE
- [CA/96/1] *"Production job-shop scheduling using Genetic Algorithms"*
IEEE /SMC'96, Pékin, Chine, Vol. 2, pp. 1519-1524, Octobre 1996
K. MESGHOUNI, S. HAMMADI, P. BORNE

Congrès nationaux et Workshop avec comités de sélection et actes

- [CN/07/2] *"Approche de sélection dans un problème d'ordonnement en présence des demandes prévisionnelles"*
Colloque sur l'Optimisation et les Systèmes d'Information (COSI'07), Oran, Algérie, Juin 2007 (CD-ROM)
D. BERKOUNE, K. MESGHOUNI
- [CN/05/1] *"Approche d'évaluation pour les problèmes d'ordonnement multicritères : Méthode d'agrégation avec direction de recherche dynamique"*
Workshop : Méthodologies et Heuristiques pour l'Optimisation des Systèmes Industriels (MHOSI'05), Hammamet, Tunisie, Avril 2005 (CD-ROM)
D. BERKOUNE, K. MESGHOUNI

Rapports de fin de contrats

- [RC/01/3] *"Modélisation et optimisation de systèmes d'exploitation dans les transports"*
Rapport de fin contrat GRRT, Avril 2001
K. MESGHOUNI, E. CASTELAIN, S. HAMMADI, P. BORNE
- [RC/98/2] *"Tests relatifs à l'introduction du service partiel dans le modèle de régulation de trafic de ligne de métro"*
Rapport de fin contrat INRETS-EC-Lille, Octobre 1998-46
S. HAYAT, K. MESGHOUNI
- [RC/97/1] *"Introduction du Service Partiel dans le Modèle de Régulation de Trafic des Lignes Automatisées du Métro"*
Rapport de fin contrat INRETS-EC-Lille, Décembre 1997-56
S. HAYAT, K. MESGHOUNI

TRAVAUX D'ENCADREMENT

Co-direction de thèses de doctorat

Thèses soutenues

[T/05/2] *"Optimisation de l'ordonnancement prenant en compte les tâches prévisionnelles"*

Djamel BERKOUNE

Doctorat d'Automatique et Informatique des Systèmes Industriels et Humains de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis

Soutenue le 13 décembre 2005 devant le Jury d'examen :

C. TAHON, Président, Professeur à l'Université de Valenciennes

P. SIARRY, Rapporteur, Professeur à l'Université de Paris 12

J. CARLEIR, Rapporteur, Professeur à l'Université de Compiègne

B. RABENASOLO, Directeur de thèse, Professeur à l'ENSAIT Roubaix

K. MESGHOUNI, *Co-directeur de thèse*, Maître de conférences, EC Lille

Publications concernées : [RI/07/6], [RI/06/5] [CA/05/17] [CA/05/16]
[CA/04/15] et [CA/04/14]

Fonction actuelle : A.T.E.R, INSA de Toulouse

L'objet de cette thèse était la mise en œuvre de méthodologies coopératives pour résoudre les problèmes d'ordonnancement d'ateliers de types job-shops flexibles avec des demandes prévisionnelles. Il s'articulait autour de deux parties principales. La première consistait à trouver un ordonnancement pour les demandes fermes, afin d'optimiser un certain nombre de critères. La deuxième partie consistait à mettre au point des méthodes permettant l'insertion des demandes prévisionnelles dans les solutions trouvées initialement tout en optimisant les critères considérés.

Un ensemble de méthodes statiques et surtout dynamiques ont été mises en œuvre. Ces méthodes dynamiques sont en partie la principale originalité de ce travail. Elles permettent de réordonner les ordres de fabrication au fur et à mesure des changements des caractéristiques des demandes.

Pour tester l'efficacité de ces solutions, nous avons déterminé une approche basée sur le calcul des bornes inférieures pour les critères concernés. Ces derniers se calculent d'une part pour les demandes fermes en utilisant une méthode classique et d'autre part pour les demandes prévisionnelles grâce à une méthode nouvelle développée dans cette thèse.

En fin, une méthode de résolution pour les problèmes multicritères est proposée pour aider le décideur quand il ne peut pas donner une préférence particulière aux critères.

[T/04/1] *"Contribution à la résolution des problèmes de régulation dans les systèmes de transport dans un contexte multicritère par approche évolutionniste"*

Mahjoub DRIDI

Doctorat d'Automatique et Informatique Industrielle de l'Université des Sciences et Technologie de Lille et l'Ecole Centrale de Lille

Soutenue le 6 décembre 2004 devant le Jury d'examen :

C. VASSEUR, Président, Professeur USTL

A. ARTIBA, Rapporteur, Professeur, Faculté Catholique de Mons, Belgique

A. QUILLOT, Rapporteur, Professeur, Université Blaise Pascal, Aubière

A. EL MOUDNI, Rapporteur, Professeur, Université de Belfort-Montbéliard

H. PIERREVAL, Examineur, Professeur, IFMA, Aubière

E. CRAYE, Examineur, Professeur, EC Lille

P. BORNE, Directeur de thèse, Professeur, EC Lille

K. MESGHOUNI, Co-directeur de thèse, Maître de Conférences, EC Lille

Publications concernées : [RI/05/4], [CA/04/13], [CA/03/12] et [CA/03/11]

Fonction actuelle : Maître de Conférences, Université de Belfort-Montbéliard

Ce travail de thèse portait sur les problèmes de régulation dans les systèmes de transport et concernait la mise en œuvre d'un système d'aide à la décision capable de faire face aux différentes perturbations affectant les réseaux de transport multimodaux. Ces travaux s'articulaient autour de deux axes.

Le premier, concernait la modélisation d'un réseau de transport par les réseaux de Petri colorés et objets permettant ainsi de commander, d'analyser et éventuellement d'améliorer les performances des systèmes.

Le deuxième axe proposait des méthodes de résolution du problème de transport considéré et ceci par la construction de solutions de régulation que les régulateurs du trafic pourront appliquer pour réduire les effets des perturbations. Dans ce sens, ce travail a permis de développer deux approches, la première est une approche basée sur des fondements analytiques et utilisant des solveurs puissants permettant d'avoir des solutions de précision très satisfaisante. La deuxième est une approche évolutionniste qui consistait à résoudre le problème en tenant compte des diverses contraintes imposées au système et en particulier des contraintes de capacités des véhicules. Un nouveau codage et de nouveaux opérateurs de croisement et de mutation ont été utilisés. Egalement dans l'optique d'optimisation multicritère imposée par le problème. Une démarche originale a été proposée pour le calcul des différents estimateurs (indicateurs de qualité) basé sur une recherche dynamique des différents poids de la fonction à optimiser.

Thèse en cours

[T/09/1] *"Contribution à l'aide de prise de décision en vue de l'optimisation de la chaîne logistique dans l'industrie céréalière"*

Housseem Eddine MKAOUAR

Soutenance prévue en 2009

Ce sujet de thèse résulte de ma volonté de vouloir coupler les compétences acquises dans le domaine des systèmes flexibles de production manufacturière et dans le domaine de la gestion et la régulations des problèmes de transport. L'étude qui sera abordée dans cette thèse, concerne le management de la chaîne logistique (Supply Chain Management) et plus particulièrement celle concernant l'industrie céréalière. La chaîne logistique constitue un enjeu important qui régit les décisions stratégiques et organisationnelles des entreprises et contribue à l'efficacité opérationnelle de ces dernières. La chaîne logistique englobe les problèmes de planification de ressources, d'ordonnement de production et les activités de transport.

L'objectif de cette thèse est d'étudier les problèmes inhérent à ce secteur, de dégager les différents points bloquants, les contraintes et les particularités qui leurs sont liées en premier lieu. En second lieu, de proposer une méthodologie de résolution de l'ensemble, ou d'une partie des problèmes ainsi identifiés en utilisant des techniques de soft computing. Nous pensons que les résultats des travaux que nous avons menés ou co-dirigés constituent des maillons importants dans ce travail que nous proposons de co-dirigé avec le professeur Borne.

Encadrement de DEA (Master Recherche)

[D/03/4] *"Optimisation des contrôleurs continus par les algorithmes génétiques"*

Fouad MOKHTARI

DEA Automatique et Informatique Industrielle de l'USTL et EC-Lille

Co-encadrement avec Abdelkader EL KAMEL

Septembre 2003

L'automatisation d'un système nécessite entre autres une bonne connaissance du modèle décrivant le processus à automatiser. Ceci n'étant pas toujours disponible, on s'oriente de plus en plus vers la mise au point de contrôleurs palliant les manques et les limitations des modèles. Pour être fiables, ces contrôleurs doivent être robustes. Les méthodes classiques basées sur les développements mathématiques traditionnels ont montrés leurs limites. Nous assistons ces dernières années à l'émergence d'une nouvelle technique permettant le développement et la mise au point de contrôleurs robustes basée sur l'approche multimodèle. Cependant, la question de l'optimisation des ces contrôleurs reste ouverte.

Ce travail de recherche, nous a permis d'explorer une nouvelle piste permettant d'optimiser les contrôleurs robustes multi modèles en ayant recours aux algorithmes génétiques. On s'est intéressé plus précisément à l'optimisation des paramètres de prédiction du GPC (Commande Prédictive Généralisée) et à l'ajustement des paramètres des fonctions d'appartenance du modèle flou. Notre contribution s'est basée essentiellement sur le développement d'un algorithme génétique à codage réel, offrant une simplicité et une rapidité d'utilisation par rapport au codage binaire traditionnel.

Cet algorithme a été appliqué à trois études, les deux premières permettent de déterminer les paramètres "optimaux" de prédiction du GPC, alors que la troisième concerne l'optimisation des paramètres des fonctions d'appartenances du modèle flou.

- Le modèle mathématique linéaire représenté par des fonctions de transfert régissant le comportement d'un servomécanisme avec un changement de point de réglage.
- Le modèle mathématique non linéaire représenté par des équations différentielles définissant le comportement d'un réacteur chimique CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor).
- Le modèle représenté par un ensemble de données mesurées du gaz d'un fourneau Box & Jenkins.

[D/02/3] *"Application des Algorithmes Génétiques au problème de tournées de véhicules avec fenêtre de temps"*

Djamel NAIT TAHAR

DEA Automatique et Informatique Industrielle de l'USTL et EC-Lille

Co-encadrement avec Abdelkader EL KAMEL

Septembre 2002

L'objectif de ce travail était de proposer une démarche scientifique permettant d'appréhender les problèmes de routage de véhicule. En effet, ce problème est un grand classique de la distribution et de la logistique. Les enjeux d'un tel problème sont considérables pour l'industrie. Il s'agit de planifier le parcours d'une flotte de véhicules à partir d'un certain nombre de dépôts pour assurer un service à un ensemble de clients répartis sur des sites différents. Cette planification doit respecter des contraintes multiples comme les contraintes de capacité des véhicules, les contraintes horaires des clients et doit permettre l'optimisation d'un certain nombre de critères tels que le nombre de véhicules engagés, la distance parcourue, la durée des différentes tournées. Ce problème appelé PTVFT (problème de tournées de véhicules avec fenêtres temporelles) est un problème appartenant aux classes NP difficiles, pour le résoudre il est intéressant d'utiliser les méthodes de soft computing comme les algorithmes génétiques, ce travail a permis de mettre en place un nouveau codage respectant les différentes contraintes du problème ainsi que des opérateurs génétiques adaptés. Les résultats obtenus ont été très prometteurs.

[D/02/2] *"Ordonnancement prédictif: Heuristique d'insertion de tâches prévisionnelles"*

Djamel BERKOUNE

DEA Automatique et Informatique Industrielle de l'USTL et EC-Lille

Co-encadrement avec Besoa RABENASOLO

Juin 2002

Dans ce travail on s'est intéressé aux prévisions opérationnelles, où les décisions permettent d'ajuster les capacités globales des différents types de ressources en fonction des besoins exprimés par la charge, sachant qu'un plan de fabrication doit réagir aux données courantes de production, de stockage et de la demande. Les décisions qu'il génère doivent aussi prendre en compte l'évolution future du système en intégrant des données prévisionnelles. Cette intégration implique les deux composantes fondamentales de toute prédiction : le prévisible et l'aléatoire. Une prévision au plus juste des entrées et des états futurs du système de production est déterminante pour l'optimisation du plan de production. Pour qu'un plan devienne, du moins partiellement, réalisable, il doit être robuste, c'est à dire peu sensible aux écarts aléatoires entre les prévisions et la réalité. Cette précision consiste principalement à définir quand et comment ajuster la capacité de production sur les différents centres de réalisation, ceci est traduit par des actions telles que :

- Répartir les moyens entre les centres de réalisation.
- Envisager les modifications d'horaires ou le recours à des ressources externes de façon temporaire.
- Préciser les délais et les résultats attendus des projets définis précédemment, voir même confirmer ou infirmer leur déroulement (embauche, investissement...).
- Accepter une délocalisation temporaire partielle ou totale d'unités de production ou de stockage.
- Ajuster les politiques de maintenance des ressources.

Les résultats obtenus par le biais de ce travail ont été très encourageants et permis à Monsieur BERKOUNE de poursuivre ces travaux dans le cadre d'une thèse au sein de notre équipe dans la même thématique.

[D/99/1] *"Application des algorithmes génétiques à la régulation du trafic de bus"*

Mohamed Ali ALOULOU

DEA Automatique et Informatique Industrielle de l'USTL et EC-Lille

Co-encadrement avec Slim HAMMADI

Juin 1999

Le travail réalisé était inscrit dans le cadre d'un projet recherche prospective soutenu par la région dans le cadre du Groupement Régional Nord Pas de Calais pour la Recherche sur les Transports (GRRT). Il visait à étudier la possibilité d'utiliser les algorithmes génétiques pour la régulation du trafic des autobus. Le travail effectué dans ce cadre a permis de proposer une nouvelle approche de régulation conçue à l'aide des Algorithmes Génétiques. Cette approche se base sur une façon originale de codage spécifique au problème, robuste et simple à mettre en œuvre. L'objectif était de traiter le problème de régulation en ligne des bus et en particulier le cas d'une ligne à fréquence élevée. Il fallait concilier entre les deux principaux critères : la régularité et la ponctualité. Les résultats obtenus dans cette étude ont été enthousiasmants et ont constitué une base de départ de plusieurs travaux effectués dans l'équipe ID, parmi eux, ceux de monsieur DRIDI que j'ai codirigé avec le professeur BORNE.

ACTIVITES D'INTERET COLLECTIF AUX NIVEAUX NATIONAL ET INTERNATIONAL

- Membre élu de la Commission des Spécialistes de l'Ecole Centrale de Lille.
- Membre élu du Conseil Scientifique de l'Ecole Centrale de Lille.
- Membre du Conseil du LAGIS.
- Membre IEEE.
- Lecteur pour la revue IEEE SMC
- Lecteur pour European Journal of Operational Research.
- Lecteur pour les congrès IEEE SMC'02, SMC'00, SMC'99
- Lecteur pour les congrès CESA '98, CESA '03, CESA '06
- Vice-président du "PhD Student Activities Committee" de IEEE SMC en 2002.
- Secrétaire du Symposium "Intelligent Automation and Control" du congrès WAC'2006 (Budapest, Hongrie)
- Membre du comité d'organisation des congrès CESA '98, CIFA '00, IEEE/SMC'02.
- Membre du comité d'organisation du workshop international logistique et transport en 2006 et 2007.
- Responsable du site web pour le congrès IEEE/SMC'02, des workshops LT'06 et LT'07.
- Animation d'une collaboration avec l'INRETS pour la résolution des problèmes de régulation des réseaux de transport en commun.
- Co-animation de l'axe III "Optimisation stochastique pour la supply chain" du projet MOST.
- Co-animation du volet III (Système d'Aide à la Décision) du projet SART (Système d'aide à la régulation de systèmes de transport multimodaux) dans le cadre du GRRT.
- Participation au groupe de travail GRAISyHM.

**ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT & ENCADREMENTS
PEDAGOGIQUES**

ACTIVITES D'ENSEIGNEMENT

De part de l'intérêt que je porte au domaine de l'informatique industrielle et plus particulièrement à la recherche opérationnelle dans le cadre de mes activités de recherche, c'est tout naturellement qu'une partie importante de mes activités d'enseignement porte sur ce domaine. Ces activités ont débutées en 1996/1998 à l'Ecole Centrale de Lille comme vacataire, puis se sont poursuivies en 1998/1999 comme enseignant contractuel sur un poste de Professeur agrégé. J'ai été amené durant cette période à assurer des enseignements d'initiation à l'algorithme et à la programmation informatique ainsi d'étude et d'analyse fonctionnelle et organique de projets informatiques. Depuis septembre 1999, je suis Maître de conférences à l'Ecole Centrale de Lille. Le contenu de mes enseignements a évolué tant au niveau de la diversification qu'au niveau des responsabilités.

Enseignements dispensés

Depuis ma nomination comme Maître de conférences à l'Ecole Centrale de Lille, mon spectre d'enseignement a considérablement été élargi. Il est à noter que certaines disciplines évoquées dans cette partie ont été enseignées une année ou deux, d'autres ont changé de public (passant de la troisième année à la deuxième par exemple), voir d'autres enseignements ont complètement été modifiés par des reffermes.

Recherche Opérationnelle

Dans le cadre de la formation dispensée pour les élèves ingénieurs de deuxième et de troisième année à l'IG2I (Institut de Génie Informatique et Industriel, département de l'Ecole Centrale de Lille) et ce depuis 1999, j'ai eu la possibilité d'intervenir avec mon collègue Emmanuel CASTELAIN dans le cadre des travaux dirigés dans le domaine de la recherche opérationnelle. Depuis 2001, j'ai pu reprendre ce module et je dispense les cours et les travaux dirigés. J'ai effectué quelques aménagements et modification pour que le cours puisse constituer en premier lieu une base solide pour les enseignements proposés principalement en quatrième année et en deuxième lieu, être en phase avec les nouvelles avancées dans le domaine de la recherche opérationnelle. J'aborde essentiellement les chapitres suivants :

- Théorie des graphes
- Ordonnancement
- Chaines de Markov
- Processus aléatoires et théorie des files d'attente
- Programmation Linéaire

En marge de ce cours, j'ai pu assurer pour les élèves de troisième année de l'option Génie Informatique des travaux pratiques en recherche opérationnelle permettant ainsi de mettre en évidence via le logiciel SimNet et à travers des simulations en réseaux de Petri, les problématiques des files d'attente.

Chaîne logistique (Supply Chain Mangement)

Cet enseignement représente la continuité naturelle de la recherche opérationnelle. Il portait préalablement le nom de Gestion de la Production Assistée par Ordinateur. J'ai encadré les travaux pratiques pour les élèves de quatrième année de la formation IG2I et ce

depuis 1999. Dans le cadre de la réforme des enseignements qui a eu lieu en 2004, j'ai été amené avec mon collègue Emmanuel CASTELAIN à repenser cet enseignement et mettre en place un nouveau cours plus complet et qui soit en adéquation avec les nouvelles avancées dans le domaine de la gestion de la production. Je participe actuellement au cours dispensé aux élèves de quatrième année. Nous abordons les chapitres suivants :

- Logistique de production
- Structure de l'entreprise
- Gestion des flux industriels
- Gestion des stocks
- Lean Production (Juste à Temps)
- MRP II

Nous avons profité également de cette évolution pour proposer une nouvelle maquette pour les travaux pratiques sur le logiciel PRELUDE.

Informatique

L'enseignement de l'informatique comporte plusieurs volets ; Le premier concerne les éléments de programmation en langage C pour les élèves de la première année de l'Ecole Centrale de Lille, il est organisé en séminaires (Cours et travaux pratiques dans des salles informatiques) permettant d'alterner formation théorique et pratique. J'ai pu dispenser également des séminaires d'initiation à la programmation en langage Ada pour la formation ITEEM (Institut Technologique Européen d'Entrepreneuriat et de Management) qui est aussi un département de l'Ecole Centrale de Lille). La deuxième partie du volet informatique concerne l'aspect gestion de projet informatique, où les élèves ingénieurs de deuxième année doivent réaliser un projet de gestion ; notre rôle consiste à assister les élèves à travers les travaux dirigés, à construire une analyse fonctionnelle et organique (MCC, MCD, MPD) du projet, puis à travers les travaux pratiques de le réaliser en utilisant un outil de gestion de base de donnée relationnelle (ACCESS)

Par ailleurs, je participe depuis l'année 2000 à l'activité pédagogique de l'École De Hautes Études Commerciales du Nord (EDHEC), où je dispense des enseignements sur les systèmes d'information et la gestion de projet.

Mathématiques Appliquées

Les cours de mathématiques appliquées constituent un élément très important de mon domaine d'intérêt, c'est pourquoi et depuis l'année scolaire 2000/2001, j'ai eu la possibilité d'intervenir dans les cours d'Analyse numérique dispensés aux élèves de première année de l'Ecole Centrale de Lille. J'ai pu également à partir de 2004 intervenir dans les enseignements des cours de probabilité et statistique pour le même public. Par la même occasion, j'ai eu en charge de reprendre la responsabilité de l'enseignement des probabilités et des statistiques industrielles pour les élèves de première et de deuxième années de la formation IG2I.

Micro-Informatique

Depuis 2004/2005, j'assure avec deux de mes collègues une partie du cours de micro-informatique qui se présente sous forme de séminaire. Initialement, il concernait l'étude des microcontrôleurs à cœur 51 (80515) et ses logiciels SIMIS, EVA51 et EMA, puis nous avons développé ce cours pour aborder des microcontrôleurs plus performants et qui sont en

adéquation avec le développement de cette technologie, il s'agit des PIC de MICROCHIP et plus particulièrement la série 18F. Nous abordons à travers le logiciel MPLAB ICD2, plusieurs Applications en langage Assembleur et C. Telles que ;

- Compteur/Décompteur sur 4 afficheurs
- Conversion analogique numérique
- Commande PWM
- Timer et gestion des interruptions
- Synthèse pour une fonction ludique "le carillon"

Cet enseignement s'avère très utile pour une utilisation directe par les élèves dans leur activité projet qui doit être menés dans le cadre de leur scolarité.

Le tableau suivant donne une synthèse chiffrée de mes activités d'enseignement durant l'année scolaire 2006/2007

Intitulé	Niveau	Cours	TD	TP
Recherche Opérationnelle I	L1	16h	16h	
Recherche Opérationnelle II	L2	10h	10h	
Chaine logistique	L4	2h		2*20h
Informatique I	G1		20h	20h
Informatique II	G2		16h	16h
Micro-Informatique	G2		2*16h	
Statistique Industrielle	L2	14h		
Probabilité	L1	8h	10h	
Probabilité et statistique	G1		16h	
Analyse numérique	G1		16h	
Total équivalent TD			261,67h	

ENCADREMENTS PEDAGOGIQUES

Encadrement de Projets

L'activité projet est un des piliers de la formation des élèves ingénieurs à l'Ecole Centrale de Lille, en effet, les élèves sont amenés à réaliser par groupe de cinq à six membres, un projet (étude, conception et réalisation d'un prototype) en collaboration étroite avec un partenaire industriel. Dans ce cadre, j'ai eu en charge la direction scientifique de plusieurs projets :

- 1) Elaboration d'une plateforme de synthèse d'annonces téléphoniques. Partenariat avec France Télécom (2006/2008)
- 2) Conception et réalisation d'un système automatique de distribution de cartes d'une donne de tarot pour les compétitions officielles. Partenariat la FFT (2006/2008)
- 3) Conception et réalisation d'un prototype de kit qui permet de supprimer durablement les mauvaises odeurs provenant du circuit d'air de la climatisation des véhicules. Partenariat l'entreprise RENAULT (2005/2007)
- 4) Conception et réalisation d'une interface facilitant la prise de sang, compatible avec un lecteur glycémie et utilisable par les mal et/ou les non-voyants. Partenariat avec l'entreprise LIFESCAN de Johnson & Johnson et l'association A.F.D (2005/2007).
- 5) Conception et réalisation d'un ensemble de nouvelles fonctionnalités pour un robot culinaire. Partenariat l'entreprise SEB (2004/2006)
- 6) Conception et réalisation d'un nouveau système automatisé de pompe à essence. Partenariat Plastic Omnium. Mais réorientation du projet après la défaillance du partenaire en la Commande à distance d'une plate-forme différentielle avec comme partenaire le LAGIS (2004/2006)
- 7) Conception d'une tablette interactive à relief évolutif permettant de retranscrire des schémas ou des graphiques avec une interface connectée à un ordinateur (Suite du projet précédent). Partenaire CEA (2004/2006)
- 8) Conception et réalisation d'une interface de jeux d'échecs pour les aveugles et malvoyants. Partenariat avec l'entreprise TECHNIBRAILLE (2003/2005)
- 9) Conception et réalisation d'une plateforme électronique médicale permettant de gérer le traitement diabétique chez les jeunes enfants. Partenariat avec l'A.J.D et l'Hôpital Necker (2003/2005)
- 10) Elaboration d'un système électronique de guidage pour déficients visuels dans le métro. Partenariat avec l'entreprise CECIAA (2002/2004).
- 11) Elaboration d'une surface à relief évolutif pour la transcription d'images pour malvoyants. Partenariat avec le CEA (2002/2004)

Encadrement et suivi de stages

Je participe également à l'activité pilotage dans le cadre des projets des élèves de 1^{ère} et de 2^{ème} année ; En effet, chaque projet se voit attribuer un consultant en gestion de projet nommé pilote dont le rôle est de favoriser l'émergence d'une démarche de projet et de fournir des méthodes de gestion de projet. J'ai eu en charge une douzaine de projets.

J'ai assuré également l'encadrement de stages pour les élèves ingénieurs de la formation IG2I, principalement les stages de deuxième, quatrième et cinquième année.