

Analyse du domaine de travail pour les problèmes de tournées de véhicules

Bernat GACIAS^{1,2}, Julien CEGARRA³, Pierre LOPEZ^{1,2}

¹CNRS ; LAAS ; 7 avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse

²Université de Toulouse ; UPS, INSA, INP, ISAE ; LAAS ; F-31077 Toulouse

³CLLE ; Université de Toulouse ; 5 allées Machado, F-31058 Toulouse

bernat.gacias@laas.fr, julien.cegarra@univ-jfc.fr, pierre.lopez@laas.fr
http://www.laas.fr/ – http://clle.univ-tlse2.fr/

Résumé— Cet article s'inscrit dans une démarche de proposition d'une approche interdisciplinaire appliquée à la logistique des transports. On s'intéresse plus particulièrement à la conception d'une architecture générique pour le problème de tournées de véhicules (VRP). On propose ainsi une articulation entre des méthodes de recherche opérationnelle (principalement la programmation par contraintes) et une analyse du domaine de travail issue de l'ergonomie cognitive.

Mots-clés— Problèmes de tournées de véhicules, analyse du domaine de travail, programmation par contraintes.

I. INTRODUCTION

L'optimisation des tournées de véhicules est devenue l'une des préoccupations les plus fréquentes pour les entreprises concernées par la distribution de biens et de services. En effet, la compétition accrue entre entreprises d'un même secteur d'activité implique des objectifs de qualité de service à respecter dans la satisfaction des demandes clients. En logistique des transports, il faut notamment veiller à délivrer les produits en temps et en heure.

Cet intérêt, très présent chez les entreprises, a été transféré aux chercheurs. Ainsi, depuis une quinzaine d'années environ, on assiste à un véritable engouement de la communauté de la Recherche Opérationnelle pour la problématique suscitée par cette gestion des tournées. Il existe actuellement une large taxonomie des problèmes, ainsi qu'une panoplie importante de méthodes pour résoudre très efficacement les nombreuses variantes existantes [1].

Dans les approches classiques de résolution des problèmes de tournées de véhicules, les facteurs humains et les aspects dynamiques sont généralement négligés. Afin de pallier ces limitations importantes, nous proposons dans cet article une architecture générique pour la conception d'un système d'aide à la résolution de problèmes de tournées de véhicules. Nous adoptons pour cela une démarche interdisciplinaire faisant converger deux composantes : (1) une interface humaine ou écologique basée sur une hiérarchie d'abstraction issue d'une analyse du domaine de travail, un pan de l'Ergonomie Cognitive ; (2) des mécanismes de résolution basés sur des techniques de la Recherche Opérationnelle, notamment la programmation par contraintes (cf. figure 1).

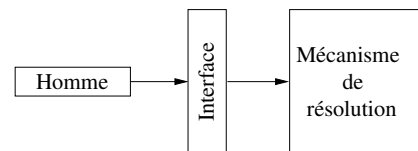


Fig. 1. Système d'aide à la décision

Chacune des approches sous-jacentes à cette démarche est détaillée dans les paragraphes suivants. A la suite, une architecture est proposée. Un scénario permet d'illustrer un fonctionnement réaliste de la conception et la modification d'une tournée. Enfin, des perspectives d'expérimentations sur données réelles sont évoquées.

II. PROBLÈMES DE TOURNÉES DE VÉHICULES

Le problème de tournées de véhicules (en Anglais *vehicle routing problem* ou VRP) consiste à déterminer les itinéraires à suivre par une flotte de véhicules de transport (de biens, de passagers) de manière à satisfaire un ensemble de requêtes clients (livraisons, collecte, ramassage) (cf. figure 2).

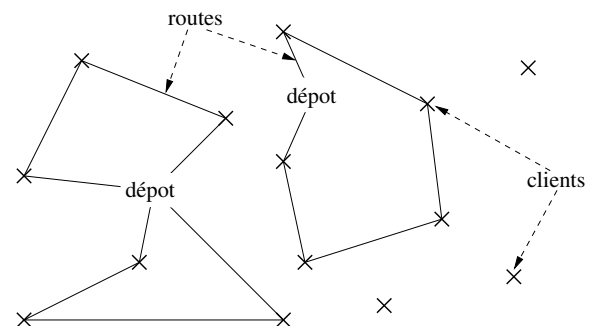


Fig. 2. Tournées de véhicules

L'environnement réel dans lequel évoluent les véhicules de la flotte suscite de nombreuses contraintes qu'il est nécessaire de prendre en compte pour l'établissement des tournées. Des méthodes issues de la Recherche Opérationnelle existent pour résoudre efficacement certaines des nom-

breuses variantes du VRP [1]. Il s'agit principalement de métaheuristiques (Tabou, algorithmes génétiques...).

Toutefois, on peut raisonnablement estimer que l'approche traditionnelle de résolution des problèmes de tournées de véhicules possède deux limitations importantes.

La première est que la considération des facteurs humains est très majoritairement absente des phases de modélisation des problèmes. Il s'agit notamment du rôle du planificateur ou superviseur de tournées qui peut contribuer à l'élaboration de la tournée si tant est qu'on lui laisse la possibilité d'agir sur les contraintes du problème traité. En effet, il peut disposer de connaissances ou d'heuristiques pour anticiper les aléas tels que les commandes urgentes, les pannes de véhicules, les embouteillages sur certaines routes, le remplacement de chauffeurs, etc. (cf. [2] pour une discussion sur la contribution qui peut être apportée par l'humain). Il est donc important de permettre à l'humain d'agir sur les contraintes pour qu'il puisse contribuer à la robustesse de la tournée produite par l'outil.

La seconde limitation est liée au fait que les modèles sur lesquels s'effectuent la résolution sont imperméables aux changements rapides de situations. En effet, la dynamique dans ce domaine est très forte et, dans certains cas extrêmes, les contraintes peuvent avoir été modifiées avant même la fin de la phase de modélisation.

III. PROGRAMMATION PAR CONTRAINTES

A. Généralités

Afin d'intégrer, de manière interactive et incrémentale, les contraintes du problème, nous nous plaçons dans le paradigme de la programmation par contraintes (PPC) [3], [4]. Un tel paradigme présente en effet de multiples avantages pour la problématique qui nous occupe.

En premier lieu, et c'est la principale originalité de la PPC, il s'agit d'une approche qui favorise la séparation entre la définition formelle du problème, les mécanismes d'analyse du système de contraintes induit par cette définition (propagation) et les méthodes de résolution (cf. figure 3). Cette caractéristique nous paraît particulièrement importante pour la conception de systèmes flexibles permettant la considération d'une coopération au sein du système Homme-Machine.

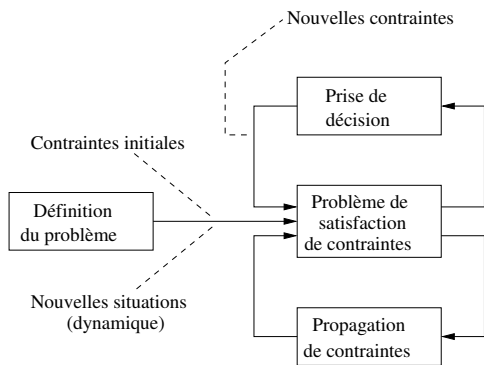


Fig. 3. Programmation par contraintes

Ensuite, en PPC, le traitement des contraintes n'est pas globalisé, mais au contraire particularisé en fonction du type de la contrainte traitée, suivant l'assertion

« 1 contrainte = 1 algorithme ». Ce principe permet notamment de décomposer le système de contraintes global en autant de sous-problèmes que de types de contraintes et de spécialiser ainsi le processus de propagation de contraintes (filtrage de valeurs inconsistantes du domaine d'une variable).

Un autre avantage de la PPC pour la conception d'un système coopératif est la facilité de prise en compte des contraintes secondaires ou des préférences. Ces contraintes sont d'un type un peu particulier puisqu'elles ne définissent pas des restrictions rigides. Dans les problèmes réels, leur satisfaction totale rend souvent les problèmes sur-contraints, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de solution réalisable au problème; on cherche alors à minimiser le nombre de contraintes violées (problème dit « max-CSP »). La théorie des problèmes de satisfaction de contraintes (CSP) propose un cadre pour la prise en compte de ces contraintes par le formalisme des CSP pondérés (*weighted CSP* ou wCSP). On a alors un problème d'optimisation à résoudre où il s'agit de respecter les contraintes « dures » tout en minimisant le poids total des contraintes « molles » violées.

Enfin, le paradigme de la PPC par son aptitude à l'ajout incrémental de nouvelles contraintes, est bien adapté à la prise en compte de la dynamique du problème traité. Des formalismes spécialisés comme ceux des CSP dynamiques [5] et des CSP mixtes et conditionnels [6] sont tout particulièrement prometteurs.

B. Résolution pour le VRP

Un des avantages de l'approche proposée est la possibilité de réaliser une hybridation entre mécanismes de PPC et d'autres techniques de résolution davantage dédiées. Dans [7], les auteurs proposent une méthode basée sur la recherche de plus courts chemins pour associer des techniques diverses de résolution du problème réel à résoudre. Cette identification est faite à partir des ressemblances entre le problème réel, une fois modélisé, et les problèmes classiques de la littérature pour lesquels des méthodes et algorithmes de résolution efficaces sont connus.

Le système proposé permet aisément d'intégrer cet aspect. Après application de la PPC, nous pouvons traiter le problème par les techniques de résolution qui se sont avérées les plus efficaces pour résoudre des problèmes semblables au problème réel. Les décisions prises par ces techniques et algorithmes peuvent ensuite être réintégrées dans le mécanisme de résolution de la PPC.

IV. ANALYSE DU DOMAINE DE TRAVAIL

Nous effectuons une analyse du domaine de travail (*work domain analysis* ou WDA) pour le problème de tournées de véhicules. Il s'agit d'une méthode permettant de faciliter l'identification des contraintes du problème. En cela, elle constitue une première étape dans le développement d'un système de résolution du problème de tournées de véhicules. Le modèle issu de cette analyse a la vocation d'être robuste et permet de contourner les écueils énoncés précédemment. Il est ainsi bien adapté à la prise en compte de l'Homme en tant qu'acteur du processus de décision et agent d'exécution (voir par exemple [8], [9]). De plus, les contraintes du problème étant considérées de manière exhaustive dans le modèle, ce dernier doit pouvoir absorber plus facilement

les changements et perturbations qui surviendront en cours d'exécution des plans.

Dans notre approche, nous proposons une décomposition du domaine de travail et une identification des limites structurelles du problème. Nous utilisons pour cela la hiérarchie d'abstraction proposée dans [10], [11] qui assure une décomposition exhaustive du domaine de travail permettant de prendre en compte toutes les contraintes (cf. figure 4).

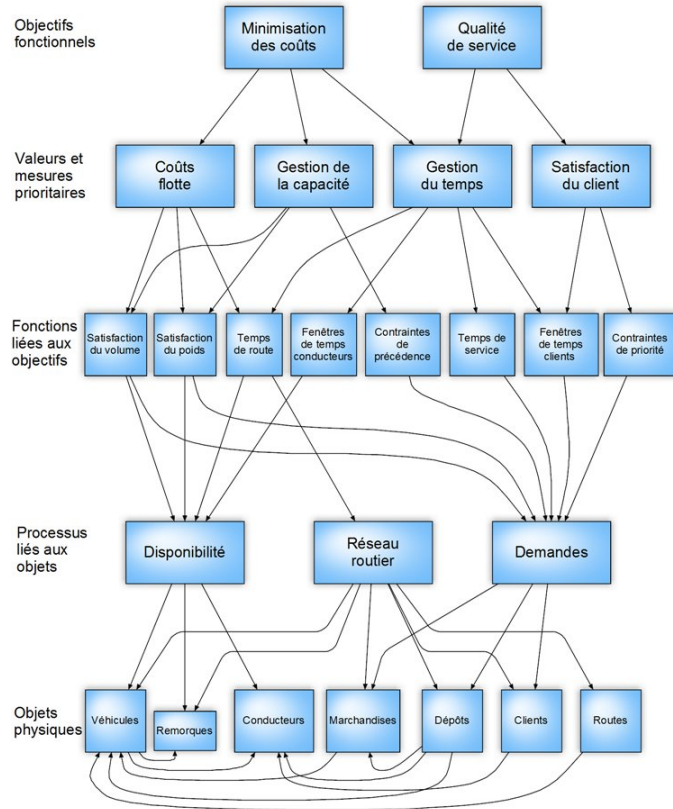


Fig. 4. Analyse du domaine du VRP au travers d'une hiérarchie d'abstraction

Les niveaux de la hiérarchie d'abstraction représentent les différents niveaux de raisonnement de l'utilisateur pour résoudre le problème. Nous avons décidé de conserver les cinq niveaux proposées dans [11] qui s'avèrent nécessaires pour le problème de VRP considéré (cf. § VI).

Les objectifs principaux du système sont indiqués dans le plus haut niveau de la hiérarchie. Dans le problème de tournées de véhicules, ces objectifs sont la minimisation des coûts et le maintien d'une qualité de service satisfaisante. Dans le deuxième niveau, nous trouvons les critères utilisés pour juger si le système atteint les buts. Ces critères sont les coûts de gestion de la flotte, la gestion de la capacité de transport et la gestion des contraintes temporelles (mises en service et fenêtres temporelles) dans le cas de la minimisation des coûts, la satisfaction de la demande et encore la gestion des contraintes temporelles pour atteindre une qualité de service suffisante. On s'aperçoit que les critères sont parfois contradictoires. Par exemple, un léger retard de livraison pourrait permettre en contrepartie une limitation du coût des transports, en nécessitant moins de conducteurs par exemple. Ce qu'on propose est d'offrir différents critères d'évaluation à l'utilisateur afin qu'il dispose des éléments nécessaires pour choisir la solution la

plus satisfaisante (par exemple, satisfaction client ou coût de transport).

Les fonctions à respecter pour atteindre les objectifs sont représentées dans le troisième niveau de la hiérarchie. En fait, ce sont les contraintes à satisfaire si l'on veut que le système atteigne les buts. Finalement, dans les deux derniers niveaux, on trouve les objets physiques du problème des tournées de véhicules (véhicules, conducteurs, marchandises, dépôts, clients et routes) et les processus qui définissent les capacités et limites des objets. Par exemple, les conducteurs peuvent être en nombre limité, et cette contrainte doit être prise en compte par la PPC (pour déterminer une solution compatible avec cette limite) et par l'humain (qui peut, par exemple, chercher des conducteurs supplémentaires pour relâcher la contrainte).

V. ARCHITECTURE PROPOSÉE

Comme nous l'avons déjà signalé, le WDA est le point de départ pour la conception d'un système d'aide à la décision pour le problème de tournées de véhicules. Un mécanisme de résolution basé sur des techniques d'optimisation fait également partie intégrante de ce système. Enfin, une interface dite « écologique » permet à l'utilisateur d'interagir avec le système, aussi bien d'ailleurs pour la modélisation que pour la résolution du problème (cf. figure 5). L'interface écologique est l'interface capable de représenter l'analyse du domaine sous la forme d'une hiérarchie d'abstraction afin de servir comme modèle mental externe pour la résolution du problème. L'information physique mais aussi l'information fonctionnelle sont révélées par l'interface dont le but principal consiste à épauler l'utilisateur dans son adaptation aux changements et à la nouveauté.

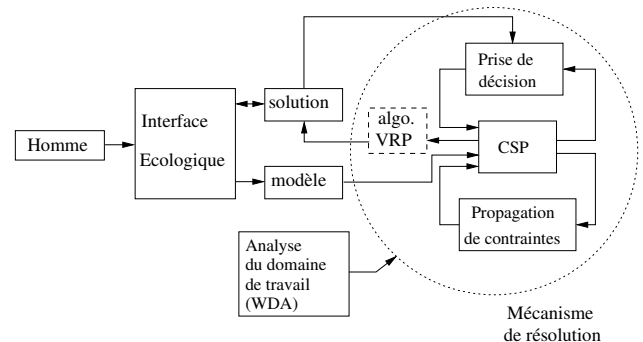


Fig. 5. Système d'aide à la décision

Dans l'interaction proposée par cette architecture, il faut s'intéresser à la distribution des tâches entre l'Homme et le Système.

La tâche principale pour l'utilisateur est la définition des contraintes du problème. Plus particulièrement, il doit sélectionner les contraintes actives lors de l'exécution en ligne. Il peut exprimer ses préférences concernant la stratégie de résolution (type de méthodes, d'algorithmes, paramétrage des techniques afférentes); il peut modifier toutes les données du problème. Un autre aspect qui permet d'aider l'utilisateur face aux imprévus et aux aléas est la possibilité que lui offre le système pour modifier localement la solution (voire un ensemble de solutions) qui lui est présentée, puis de l'évaluer.

D'un autre côté, les actions dévolues au Système (méthodes de résolution, techniques de propagation, heuristiques d'instanciation) sont : de sélectionner des algorithmes utiles pour le contexte; de proposer et d'évaluer un ensemble de solutions admissibles; d'offrir la possibilité de réévaluer des solutions modifiées.

VI. SCÉNARIO ILLUSTRATIF

Nous avons préparé un scénario d'un problème simple de tournées de véhicules afin d'illustrer le fonctionnement du système d'aide à la décision proposé.

Nous considérons un problème avec 4 clients à servir. Pour chaque client C_i nous avons une demande de marchandise d_i et une fenêtre de temps de livraison à respecter TWC_i . Pour servir les clients nous disposons d'une flotte de 2 véhicules V_j , avec une capacité de transport fixe ($Q = 7$ unités de produit) et nous disposons également de 2 conducteurs D_i avec leurs fenêtres de temps respectives TWD_i . Notons que ces fenêtres de temps permettent de considérer les différentes rotations des travailleurs ou les contraintes temporelles dues aux réglementations du travail. Les distances entre le dépôt et les clients ne sont pas considérées dans cet exemple, de façon à le rendre plus facile à comprendre.

Le tableau I décrit les données du problème. De plus, nous allons considérer une contrainte d'affectation véhicule-client (marchandise), où le client C_4 doit être obligatoirement servi par le véhicule V_2 . Cela peut correspondre par exemple au fait que les produits demandés pour chaque client sont différents et que V_2 est le seul véhicule adapté pour transporter la marchandise de C_4 .

Comme nous l'avons déjà signalé, le système proposé permet à l'utilisateur de choisir la meilleure stratégie de résolution pour le problème réel. Dans ce cas, l'utilisateur impose que tous les clients soient servis.

(a)			(b)	
i	d_i	TWC_i	j	TWD_j
C_1	2	[4, 8]	D_1	$[0, 4] \cup [8, 12]$
C_2	3	[5, 10]	D_2	[0, 8]
C_3	2	$[0, 2] \cup [10, 12]$		
C_4	5	[8, 12]		

TABLE I
DONNÉES DE L'EXEMPLE

Une fois que l'utilisateur a réalisé la modélisation du problème et a activé les différentes contraintes, l'analyse du domaine de travail proposée permet d'agir sur tous les aspects du scénario (soulignés en gris sur la figure 6), le mécanisme de résolution commence à propager les différentes contraintes du problème. Nous commençons par la contrainte d'affectation V_2-C_4 . De cette contrainte nous pouvons déduire que le conducteur D_1 doit être affecté au véhicule V_2 , car c'est le seul conducteur qui peut servir le client C_4 à cause des fenêtres temporelles. Si l'on examine encore les fenêtres de temps, on s'aperçoit que le conducteur D_1 ne peut pas servir le client C_1 ; ainsi, ce client est affecté au conducteur D_2 qui conduit le véhicule V_1 . Finalement, nous allons considérer la contrainte de capacité

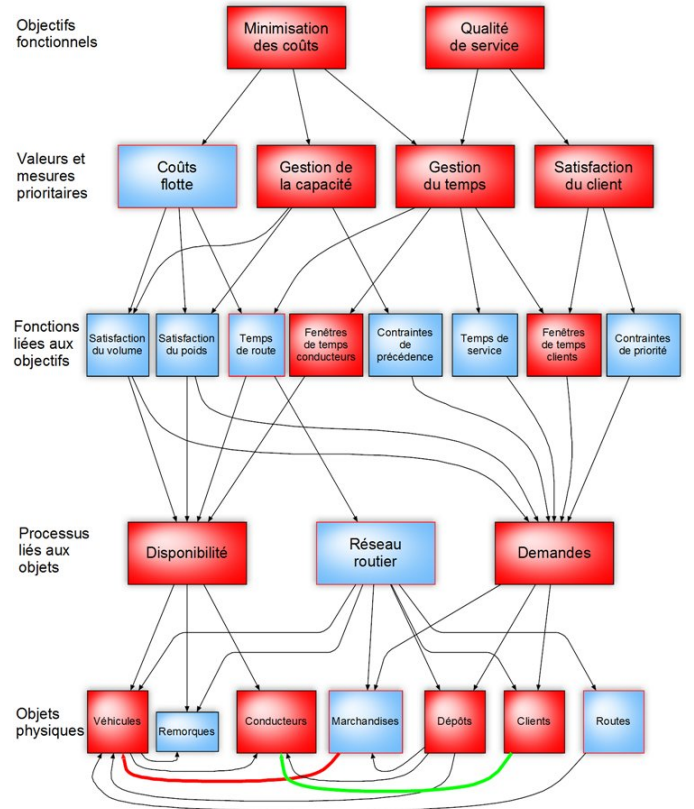


Fig. 6. Modélisation du problème à résoudre

des véhicules ($Q = 7$). Deux ensembles de solutions sont réalisables; soit le véhicule V_1 sert les clients $\{C_1, C_2, C_3\}$ et le véhicule V_2 le client $\{C_4\}$, soit le véhicule V_1 sert les clients $\{C_1, C_2\}$ et le véhicule V_2 les clients $\{C_3, C_4\}$.

Le système évalue la qualité des solutions et l'utilisateur choisit la mieux adaptée au problème. Considérons un aléa tel que le conducteur D_2 soit amené à prévenir l'entreprise de son retard. L'utilisateur analyse la situation et observe que le conducteur D_2 pourrait éventuellement avoir des problèmes pour servir le client C_3 parce qu'il ne dispose que des deux premières heures pour le servir. La décision de l'utilisateur est alors d'affecter le client C_3 au conducteur D_1 . Cette décision est intégrée dans le mécanisme de résolution. Le processus de propagation se déclenche à nouveau et, désormais, le seul type de solution est que V_1 serve les clients $\{C_1, C_2\}$ et le véhicule V_2 les clients $\{C_3, C_4\}$. Le système évalue les différentes solutions de tournées et l'utilisateur choisit la plus intéressante pour le problème réel.

VII. RÉSULTATS ATTENDUS ET CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé une architecture pour un système d'aide à la décision pour la résolution des problèmes de tournées de véhicules. Le système proposé présente des propriétés qui sont bien adaptées à la topologie des problèmes à résoudre. Le caractère novateur de cette approche interdisciplinaire est de fonder le modèle initial du problème sur une analyse du domaine qui permet d'identifier les limites structurelles du problème pour encadrer la programmation par contraintes tout en offrant un mécanisme de résolution du problème compatible avec les interventions potentielles de l'utilisateur.

Nous avons aussi réalisé une analyse du domaine de travail pour le problème de tournées de véhicules basé sur une hiérarchie d'abstraction qui doit servir de base pour la réalisation d'une interface dite « écologique » et qui serait adaptée au problème. La proposition et la validation d'une telle interface est une piste que nous poursuivons actuellement.

Dans ce contexte, nous avons établi des contacts avec une entreprise sur la thématique du VRP appliquée à la collecte de déchets. Nous allons proposer une interface Homme-Machine capable de prendre en compte toutes les variables du problème ainsi que trois variantes différentes : collecte d'ordures ménagères, collecte de déchets industriels et collecte de produits recyclables en apport volontaire. Ces trois variantes partagent des propriétés communes mais nécessitent des résolutions différentes. L'analyse du domaine pourrait, là encore, se montrer pertinente.

Finalement, nous prévoyons une comparaison avec deux études aux objectifs similaires [9], [12]. Ainsi, dans [9], l'auteur présente un système d'ordonnancement de tâches, fondé sur l'analyse du domaine, où les aspects humains sont fortement pris en compte mais au détriment de méthodes issues de la recherche opérationnelle. Dans [12], les auteurs proposent un système homme-machine fondé sur des mécanismes de propagations de contraintes mais dont les auteurs reconnaissent le manque de prise en compte de l'humain dans la partie résolution. Cette comparaison théorique et méthodologique devrait pointer les difficultés que peuvent rencontrer les chercheurs lors de la mise en place d'approches interdisciplinaires.

RÉFÉRENCES

- [1] P. TOTH et D. VIGO, éditeurs. *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA, 2001.
- [2] J. CEGARRA : A cognitive typology of scheduling situations : A contribution to laboratory and field studies. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 9(3):201–222, 2008.
- [3] R. DECHTER : *Constraint Processing*. Morgan Kaufmann, San Francisco, USA, 2003.
- [4] F. ROSSI, P. van BEEK et T. WALSH : *Handbook of Constraint Programming (Foundations of Artificial Intelligence)*. Elsevier Science Inc., New York, NY, USA, 2006.
- [5] S. MITTAL et B. FALKENHAINER : Dynamic constraint satisfaction problems. In *Proceedings of AAAI- 90, Boston , MA*, pages 25–32, 1990.
- [6] E. GELLE et B. FALTINGS : Solving mixed and conditional constraint satisfaction problems. *Constraints*, 8(2):107–141, 2003.
- [7] M. DESROCHERS, C. V. JONES, J. K. LENSTRA, M. W. P. SAVELSBERGH et L. STOUGIE : Towards a model and algorithm management system for vehicle routing and scheduling problems. *Decision Support Systems*, 25(2):109–133, 1999.
- [8] P. G. HIGGINS : *Job Shop Scheduling : Hybrid Intelligent Human-Computer Paradigm*. Thèse de doctorat, University of Melbourne, Australia, 1999.
- [9] P. G. HIGGINS : *Human performance in planning and scheduling : fieldwork studies, methodologies and research issues*, chapitre Architecture and Interface Aspects of Scheduling Decision Support, pages 245–279. London : Taylor and Francis, 2001.
- [10] J. RASMUSSEN, A. M. PEJTERSEN et L. P. GOODSTEIN : Cognitive systems engineering. *New York : Wiley*, 1994.
- [11] Kim J. VICENTE : *Cognitive Work Analysis : Toward Safe, Productive, and Healthy Computer-Based Work*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ, USA, 1999.
- [12] O. LASSILA et S. SMITH : Toward the development of mixed-initiative scheduling systems. In *ARPA/Rome Laboratory Knowledge-Based Planning and Scheduling Initiative Workshop Proceedings, San Francisco (CA)*, pages 145–154, 1994.