

Groupe MOGISA
Modélisation, optimisation et gestion
intégrée de systèmes d'activités

Resp. Pierre Lopez

*9 permanents (1 DR, 3 P, 1 CR, 4
MC), 1 post-doc, 9 doctorants*

- **Permanents** : C. Briand, J. Erschler, P. Esquirol, G. Fontan, J.C. Hennet, M.J. Huguet, C. Mercé, M. Mongeau
- **Post-doctorant** : M. Van Grieken Garcia
- **Doctorants** : Y. Arda, F. Baniel, A. Ben Hmida, C. Draghici, J. François, F. Galasso, J.F. Hernandez-Silva, B. Gutierrez, I. Lizarralde
- **HDR et thèses soutenues** : P. Lopez (HDR), E. Despontin-Monsarrat, H.T. La, C. Mancel, J. Cardillo-Albarran
- **Projets** : Responsabilité de l'équipe CNRS de l'Action coordonnée européenne CO-DESNET (action n°506673 du FP6)
- **Animation** : AS 35 (responsabilité) [81], EPML 70 (responsabilité)
- **Coopérations internationales** : U. Politehnica, Bucarest ; Faculté des Sciences, Tunis ; Ecole Polytechnique de Tunisie ; Centre de développement des Technologies Avancées, Alger ; U. Los Andes, Mérida (Venezuela)
- **Collaborations nationales** : FéRIA Systèmes Décisionnels, Toulouse ; CERTOP, Toulouse ; LTC, Toulouse ; LGP, Tarbes ; LAPS, Bordeaux ; LI, Avignon ; LI, Tours ; U. de la Réunion
- **Partenaires industriels** : Schneider Electric (Ordosoftware), IFR France, GFI Consulting, Airbus, EADS-CCR, Eurocontrol (Sofréavia)
- **Faits marquants** : coordination de trois ouvrages du traité IC2, Hermes Science [8, 9, 10] ; création du groupe en avril 2003 avec une nouvelle dynamique et la consolidation de thématiques émergentes ; création et animation de l'EPML « Pilotage intégré de chaînes logistiques : système d'information et aide à la décision » (4 laboratoires et 3 doctorants concernés) ; organisation de la 4ème conférence francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'03) [11] (plus de 130 participants venant de 10 pays différents)
- **Publications choisies** : [15, 16, 20, 21, 44, 64]

1. Problématique scientifique et positionnement

Le groupe MOGISA, créé en avril 2003, est une émanation du groupe OCSD. Sa thématique de *modélisation, optimisation et gestion intégrée de systèmes d'activités* concerne les systèmes dans lesquels des activités doivent être réalisées à l'aide de ressources. L'exécution de ces activités est soumise à des contraintes liées à l'utilisation et la disponibilité des ressources, ainsi qu'à la réalisation de projets ou de processus. Les domaines d'application se situent principalement en gestion de projets et dans les systèmes de production de biens (ateliers) ou de services (soins, entretien, transport, télécoms, spatial, etc.). Une caractéristique commune et fréquente de ces domaines est leur forte composante socio-technique, l'homme restant au centre de ces systèmes d'activités avec souvent une multiplicité de rôles.

La prise en compte explicite du caractère socio-technique des systèmes analysés amène les recherches menées dans le groupe au croisement de différentes communautés telles que celles de Génie Industriel et de Productique pour les aspects chaînes logistiques ou modélisation d'entreprise (Club GI, pôle STP du GDR MACS, IFAC), celle de recherche opérationnelle (RO) et d'intelligence artificielle (IA) pour ce qui concerne l'optimisation combinatoire, l'algorithmique, le raisonnement temporel, les systèmes à base de connaissances (ROADEF, GDR ALP et ARP, EURO, INFORMS).

Les problèmes concernent la sélection, l'affectation et l'ordonnancement de tâches, la planification des approvisionnements, de la production et de la distribution. Ces problèmes peuvent se limiter à des unités de production au sein d'une même entreprise ou être étendus à une chaîne logistique complète intégrant un réseau d'entreprises partenaires.

L'objectif est de définir des modèles, méthodes et outils permettant d'aider à analyser, à évaluer, à concevoir et à conduire ces systèmes d'activités, dans un environnement incertain et perturbé. L'accent est mis sur la généricité des modèles, l'efficacité et la cohérence des méthodologies, la réutilisabilité des outils. Cela passe par l'utilisation de techniques de RO (programmation mathématique, théorie des graphes, méthodes arborescentes, métaheuristiques) et de modèles de représentation et de traitement des contraintes issus de l'IA (propagation, satisfaction et programmation de contraintes) [2]. Sur la base de la manipulation de ces modèles et outils, nous présentons nos activités de recherche suivant trois grandes thématiques que sont la **gestion de réseaux d'activités**, l'**ordonnancement** et la **modélisation et l'optimisation de systèmes combinatoires** en privilégiant des approches possédant des objectifs différents mais complémentaires (approches par agrégation/désagrégation, par contraintes, par optimisation, par processus).

L'inscription de MOGISA dans l'ensemble des différentes communautés évoquées plus haut est une originalité majeure du groupe. En ordonnancement par exemple, nous avons été parmi les premiers à confronter, mais surtout à tirer les enseignements, des approches développées aussi bien en RO qu'en IA. Nous avons ainsi contribué à rapprocher des communautés, nationales et internationales, où les thèmes « planning » ou « scheduling » sont abordés, notamment par l'approche par contraintes que nous avons développée [21]. Les approches par contraintes, appliquées notamment au problème d'ordonnancement ont connu un grand essor ces dix dernières années ; de nombreuses équipes travaillent dans ce domaine. Nous sommes ainsi régulièrement cités par les chercheurs également à la frontière des communautés,

par exemple au Robotics Institute de Carnegie Mellon University (Stephen Smith) ou à l'Université de Toronto (Mark Fox, Chris Beck), au e-Lab de Bouygues Telecom (François Laburthe, Yves Caseau) ou encore parmi les chercheurs/développeurs d'ILOG, leader mondial en ce qui concerne les solutions logicielles d'optimisation (Claude Le Pape, Wim Nuijten, Philippe Laborie). Notons sur ce dernier point que certaines des primitives liées à la propagation de contraintes de ressources de la bibliothèque Scheduler dédiée aux problèmes d'ordonnancement empruntent directement au raisonnement énergétique que nous avons développé. Ces travaux précis ont par ailleurs été largement réutilisés à l'HeuDiaSyc (Compiègne) et au Laboratoire d'Informatique de Tours. Enfin, on peut noter au niveau national notre co-animation (avec les laboratoires d'informatique LIX de Palaiseau et LINA de Nantes) d'un groupe de travail du GDR ALP sur « Contraintes et Recherche Opérationnelle » dont les travaux ont entraîné l'édition d'un numéro spécial de la revue RAIRO/Operations Research.

Les aspects de flexibilité et de robustesse, que ce soit en planification ou en ordonnancement de production, constituent également une originalité du groupe depuis plus d'une dizaine d'années. Le groupe est internationalement reconnu pour ses travaux en planification hiérarchisée par agrégation/désagrégation [5], ainsi que pour les applications de la commande robuste à la gestion de la production et des stocks [15]. Ces travaux ont été notamment repris par le LAPS de Bordeaux (Prof. J.-P. Bourrières) et par le CRAN de Nancy (Prof. A. Thomas). Dans ce contexte, il convient de souligner que le groupe participe au comité technique IFAC « Manufacturing, Management and Control » et à l'action coordonnée européenne CO-DESNET, avec comme principaux partenaires l'Université Polytechnique de Milan (Prof. A. Villa), l'Université de Nottingham (Prof. B.L. MacCarthy) et l'Université de Linköping, Suède (Prof. R.W. Grubbström). Ces travaux prennent aujourd'hui toute leur dimension dans un contexte généralisé de conception distribuée et de processus d'ingénierie concourante. En ordonnancement de projet, nos travaux sur la robustesse sont ainsi cités dans les états de l'art faits par les personnes les plus reconnues du domaine (Prof. W. Herroelen, Katholieke Universiteit Leuven) et ont été réutilisés au LORIA à Nancy, aux Laboratoires d'Informatique de Tours et d'Avignon.

Le positionnement de notre groupe nous a conduit à participer ou à diriger différentes structures d'animation : par exemple, au sein du groupe de recherche en Ordonnancement Théorique et Appliqué, du GdR MACS (plus anciennement, de plusieurs RTP, AS et EPML).

En résumé, et en s'appuyant sur les conclusions du Comité d'Evaluation à mi-parcours (2004), un point fort du groupe MOGISA est de développer une approche originale de résolution de problèmes d'ordonnancement et de planification, (1) basée sur les notions de flexibilité et de robustesse, (2) au carrefour d'expertises : optimisation combinatoire (*RO*) et approche par contraintes (*IA*). Nous bénéficions d'un très bon positionnement national et d'une certaine reconnaissance internationale. Initialement limités au secteur de la production manufacturière, les champs d'application de nos recherches se sont élargis de manière pertinente : santé, transport, aéronautique, espace, gestion de projets.

Compte tenu d'une critique qui nous a été adressée, nous tenons à affirmer le positionnement de notre recherche en gestion de la chaîne logistique : notre travail dans ce domaine a pour objectif la consolidation et l'extension de notre ligne directrice en planification et ordonnancement de production. De ce point de vue, il ne s'agit donc pas d'une dispersion des

thèmes abordés dans le groupe.

Une autre critique concernait les aspects pluridisciplinaires (STIC-SHS) des recherches menées sur les organisations. Une analyse détaillée des difficultés et des écueils, mais aussi des enjeux de l'interdisciplinarité STIC-SPI/SHS dans notre domaine, a été effectuée dans le cadre de l'AS PRODLOG (voir [81]). Les conditions de réussite de la coopération entre chercheurs STIC-SPI et chercheurs SHS ont été mises en avant. Ces conditions n'étant pas remplies actuellement, la collaboration avec nos partenaires des SHS est très limitée et le volet interdisciplinaire de nos recherches est donc en sommeil. Cependant, notre passé de collaboration avec ces partenaires (de sociologie du travail notamment) nous a cependant conféré une sensibilité et une originalité désormais reconnues et nous restons ouverts à une recherche coopérative STIC-SHS développée autour d'un projet concret, source d'un enrichissement mutuel, chacun conservant la problématique propre à sa discipline.

2. Résultats

2.1 Gestion coopérative de réseaux d'activités

- **Pilotage intégrée de chaînes logistiques**

Un premier thème de recherche, mené initialement dans le cadre d'une EPML avec le LAPS de Bordeaux, le LGP de Tarbes et le Centre d'Etude et de Recherche : Travail, Organisation, Pouvoir (CERTOP) de Toulouse, concerne le développement d'une approche méthodologique d'organisation et d'aide à la décision pour le pilotage intégré de chaînes logistiques. Il s'agit notamment de prendre en compte la distribution des centres de décision associés aux différentes chaînes et d'intégrer le contexte à la fois coopératif et concurrentiel des différentes entités constituant les chaînes (figure 1). L'approche proposée doit permettre de répondre, d'une part, au besoin de coordination des entités au sein d'une même chaîne logistique et, d'autre part, au besoin d'autonomie de celles-ci pour faire face aux conflits d'objectifs et d'utilisation de ressources générés par leur appartenance à plusieurs chaînes logistiques.

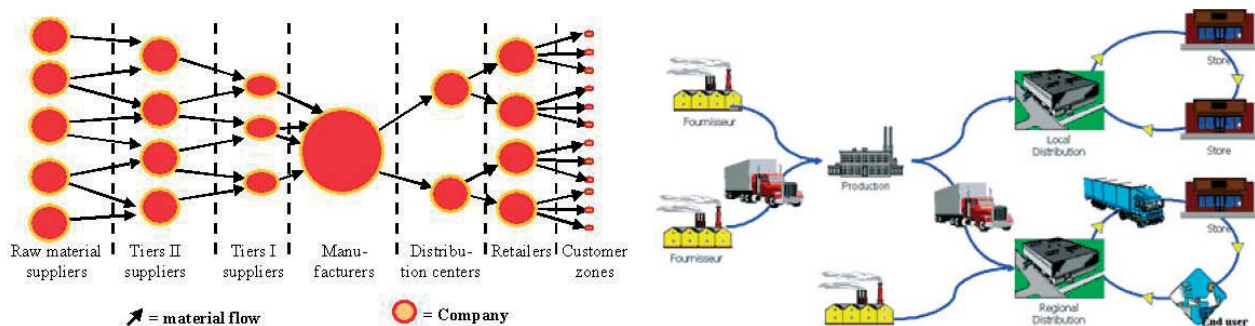


Figure 1 : Chaîne logistique

Les travaux menés ont permis d'affiner les lots de travail et d'en répartir les responsabilités sur les différents laboratoires. Une analyse bibliographique et des entretiens menés auprès d'industriels (Airbus, Turboméca) ont permis d'établir une première typologie des chaînes logistiques et de cerner plus précisément le domaine d'étude. Différents modes de

pilotage (centralisé, supervisé par chaîne, en point à point) ont été mis en évidence. Leur caractérisation, leur formalisation (UML), puis leur modélisation sous forme de programmes mathématiques permet d'évaluer leurs performances respectives face à différentes formes d'aléas et d'incertitudes (fréquents dans le fonctionnement de chaînes logistiques). Une attention particulière est donnée aux entreprises communes à plusieurs chaînes logistiques. Dans un tel contexte de partage concurrentiel de capacités, différentes stratégies d'échanges d'informations et de prises de décisions sont étudiées [100].

- **Gestion des stocks dans une chaîne logistique**

Les chaînes logistiques posent également des problèmes spécifiques de gestion de stocks. Dans ce cadre, nous avons cherché à optimiser la politique de commande et de gestion de stocks d'un producteur pouvant faire appel à plusieurs fournisseurs pour le même composant [45]. Il a été montré, en utilisant la théorie des files d'attente, que dans le cas d'une demande et de durées d'approvisionnement aléatoires, la minimisation du coût total du producteur conduit généralement à distribuer les commandes entre plusieurs fournisseurs, plutôt que de concentrer les commandes sur un seul fournisseur, fût-il le plus performant. Une technique par décomposition a permis de résoudre de façon approchée le problème général de livraison sur stock à partir du problème, analytiquement plus simple, de production à la commande.

Des études ont débuté sur l'application de la théorie des jeux aux processus de négociation entre partenaires dans le but d'analyser des problèmes liés au caractère distribué des réseaux d'entreprises et des structures décisionnelles associées. Nous avons analysé un maillon élémentaire à deux niveaux d'une chaîne logistique, composé de deux étages de production/stockage gérés par deux acteurs différents : un producteur ayant une demande aléatoire d'un produit fini et son fournisseur de produit intermédiaire. Nous avons étudié les effets des décisions locales sur les délais de livraison et nous avons montré que le contrat de coordination proposé permet d'amener les performances du système distribué vers les performances théoriques du modèle centralisé.

- **Coopération inter-entreprises**

En partenariat avec Ordosoftware, une filiale du groupe Schneider Electric, nous avons étudié le problème de la coopération inter-entreprises [77, 78, 79, 80, 84]. Il s'agit en priorité d'étudier le cas de la coopération point à point, pour une relation de type donneur d'ordre-fournisseur, dans l'objectif de tendre les flux de produits entre les partenaires. Une coopération contractualisée, basée sur la détermination conjointe de « cadres de décisions », objets partagés par les acteurs et définissant de façon flexible les paramètres des commandes (quantités, délais, coûts) a été proposée [20, 38, 46, 66, 69]. Un cadre de décision représente une double contrainte sur la trajectoire que doit suivre la courbe de la quantité cumulée de produits mis à disposition par le fournisseur pour le donneur d'ordre (quantités minimale et maximale à fournir dans une fenêtre délimitée par des délais minimum et maximum). Sur la base d'un modèle de production agrégé, les cadres de décision peuvent être modélisés par un ensemble de contraintes linéaires portant sur les variables de décision mises en jeu par la coopération. Une aide à la décision a ainsi été proposée permettant à chaque acteur de construire à tout moment un nouveau cadre de décision cohérent avec les cadres de décision déjà existants, ou de modifier un cadre de décision en mettant en évidence les répercussions de cette modification sur les autres cadres (figure 2). Cette

aide à la décision est intégrée dans un outil de coopération qui, sur la base des règles de comportement définies dans le contrat, favorise les conversations nécessaires à la négociation ou à la renégociation des cadres de décision.

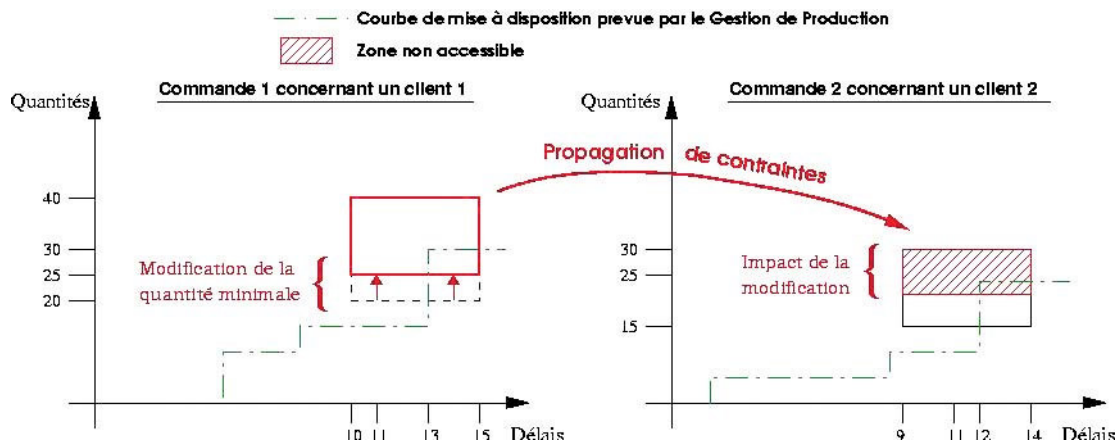


Figure 2 : Maintenance de la cohérence entre cadres de décision

La thèse d'Emmanuelle Despontin-Monsarrat, « Aide à la décision pour une coopération inter-entreprises dans le cadre de la production à la commande », soutenue le 10 décembre 2004, présente en détail ces résultats [24].

- **Pilotage d'activités de service et affectation de personnels**

Nous nous sommes également intéressés aux problèmes de pilotage d'activités de service et d'affectation de ressources humaines, en particulier dans les ateliers de maintenance automobile [44, 58, 92, 96]. Nous avons étudié :

- l'adéquation des profils des opérateurs (modélisés par un ensemble de compétences disjonctives) ;
- le problème de la détermination des rendez-vous (date de dépose et de restitution des véhicules). Il s'agit de valider, de façon coopérative et en temps réel avec le client, une fenêtre d'intervention satisfaisant à des exigences diverses (dates interdites, minimisation de la durée globale d'immobilisation, restitution au plus tôt), qui soit fiable et cohérente compte tenu de la capacité de l'atelier et du planning existant. Nous abordons ce problème comme celui de l'insertion d'un ensemble de tâches non préemptives dans un ordonnancement flexible (modèle en temps continu avec dates limites et contraintes énergétiques), la polyvalence des opérateurs étant modélisée sous la forme de « pools » de ressources cumulatives non disjoints ;
- le problème de la réaffectation dynamique des opérateurs aux activités. Il s'agit d'actualiser régulièrement l'affectation détaillée des opérateurs aux opérations de maintenance sur un horizon découpé en périodes élémentaires (ex : 1/4 heure) de façon à absorber différents aléas (retard de livraison de fournitures, absences opérateurs, modification des interventions ou de leurs fenêtres).

2.2 Ordonnancement

- **Ordonnancement agrégé / ordonnancement détaillé**

Les modules d'ordonnancement détaillés (positionnement d'opérations en temps continu sur les ressources) du marché manipulent mal les leviers décisionnels à la disposition de l'entreprise : heures supplémentaires, sous-traitance, retard/avance d'ordres de fabrication, choix de clients, de fournisseurs, ressources alternatives, ... De plus ils sont souvent utilisés à tort, pour établir une planification à long terme, servant de justification à un décideur par ailleurs soucieux de mettre en œuvre de tels leviers décisionnels. Ce type de fonctionnement est encore plus répandu face à l'exploitation complexe mais indispensable de chaînes logistiques.

Face à ce double constat, nous développons des travaux de recherche centrés sur l'élaboration d'un module d'ordonnancement agrégé, établissant en temps discret (agrégation du temps), sur un horizon de type long terme, un positionnement des tâches sur les périodes (ordonnancement agrégé) de manière à optimiser un critère construit à partir des différents leviers décisionnels. L'outil proposé est basé sur des modèles de programmation mathématique en variables mixtes, résolus par des solveurs industriels de type Xpress-MP. Cette forme de modélisation permet la généralité du modèle face à des évolutions de l'entreprise et la qualité de la résolution conduite par des approches éprouvées et en constante amélioration.

La qualité de la structure décisionnelle à deux niveaux (ordonnancement agrégé-ordonnancement détaillé) a pu être prouvée sur des jeux de données d'origine industrielle. Cette qualité a pu être observée au niveau de la robustesse et de la cohérence de la structure ainsi qu'au niveau de l'amélioration de la qualité des solutions élaborées (par rapport à celles établies par un module ordonnancement détaillé seul). De manière à assurer, l'objectivité des essais numériques et la qualité de l'analyse des performances, nous avons proposé des indicateurs de charge matérialisant la classe du problème traité (très chargé, peu chargé, ...) face à différents types d'utilisation des ressources. Il convient de remarquer qu'au delà de la classification des données, ces indicateurs permettent de proposer de nouveaux principes d'agrégation (d'opérations, de ressources, ...) aboutissant à une diminution accrue de la complexité des modèles et renforçant la pertinence de la démarche suivie [59].

- **Ordonnancement robuste**

Afin de prendre en compte les incertitudes dans un problème d'ordonnancement, une approche *robuste*, basée sur une caractérisation d'un ensemble de solutions dominantes, a été retenue [7]. Disposer d'un ensemble de solutions dominantes est utile pour réagir en temps réel aux perturbations apparaissant durant l'exécution d'un projet puisqu'il est possible de passer d'une solution à une autre avec une garantie de performance. Si les variables restent inscrites dans leur domaine initial, la propriété de dominance garantit l'existence d'au moins une solution optimale dans l'ensemble caractérisé, quelles que soient les valeurs réellement assignées aux variables. Dans le cadre de problèmes à une machine, deux techniques fondées sur la caractérisation initiale d'un ensemble de séquences dominantes ont été proposées. La première est une méthode exacte dont le but est d'éliminer de l'ensemble dominant toutes les séquences non optimales vis-à-vis du retard algébrique [39, 61, 67, 90]. La seconde propose une interaction permettant au décideur de sélectionner les retards jugés insatisfaisants, la méthode d'ordonnancement éliminant alors progressivement de l'ensemble dominant les séquences non satisfaisantes [63]. La recherche de conditions de dominance pour les problèmes « flow shop » de permutation à deux machines a débouché sur la mise en évidence d'une condition suffisante

d'optimalité permettant de caractériser un vaste ensemble de séquences [72, 93]. Il est montré que cet ensemble inclut nécessairement toutes les séquences satisfaisant la célèbre règle de Johnson, ainsi que de très nombreuses autres. Tous ces travaux sont consignés dans la thèse de H.T. La, « Utilisation d'ordres partiels pour la caractérisation de solution robustes en ordonnancement » soutenue le 24 janvier 2005.

- **Ordonnement et affectation**

En collaboration avec l'Institut Supérieur de Gestion de Tunis puis l'Unité Recherche Opérationnelle pour l'Industrie de l'Ecole Polytechnique de Tunisie, des travaux ont été menés sur la résolution de problèmes d'ordonnement avec flexibilité des ressources (problèmes *mixtes* d'ordonnement et d'affectation). Des résultats basés sur l'exploitation de procédures de recherche arborescente tronquée (notamment la recherche à déviation limitée ou « LDS ») ont été obtenus [71, 91, 94]. Les apports théoriques de ce type de méthode semblent importants puisqu'ils permettent d'envisager de nouvelles stratégies de résolution pour les problèmes d'ordonnement les plus difficiles, comme le « RCPSP » multi-modes. Une adaptation de la méthode LDS à des problèmes d'ordonnement avec flexibilité de ressources a été proposée. Elle se base sur différentes heuristiques d'instanciation de variables et de valeurs ainsi que sur une heuristique de choix de points de décision à remettre en cause pour explorer de nouvelles solutions. Une validation expérimentale a débuté sur de jeux de données de « job shop » flexibles.

- **Plate-forme logicielle**

Le projet LORA a pour objet la réalisation d'une plate-forme logicielle d'expérimentation de méthodes d'ordonnement de tâches et d'affectation de ressources [86]. Comme l'indique la figure 1, la plate-forme héberge des collections, pouvant être enrichies, de problèmes, d'algorithmes de résolution, de solutions. Elle est munie d'une interface qui permet notamment de modéliser un problème, de le classifier, de faire appel à un ou plusieurs algorithmes pour le résoudre, de comparer les résultats obtenus et de les visualiser graphiquement.

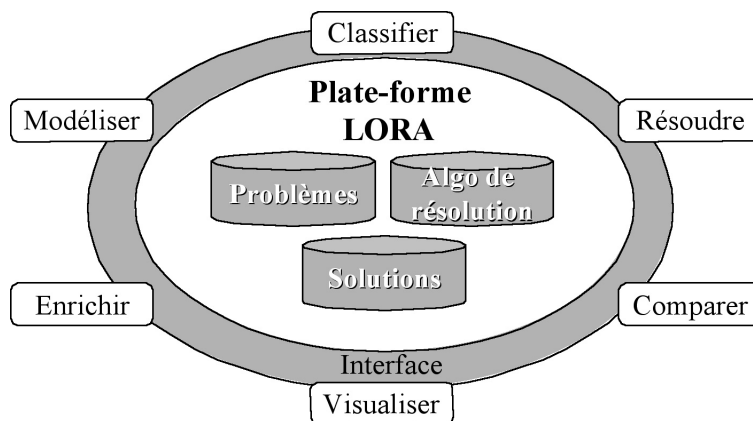


Figure 3 : Architecture de LORA

Le formalisme graphique inédit des « diagrammes de tâches » [30] permet la représentation de contraintes temporelles entre deux événements, de contraintes de séquençement, d'alternatives de réalisation et de relations de composition-abstraction (tâches,

macro-tâches). Par un autre formalisme, on déclare les ressources et leurs caractéristiques (intensité et énergie disponibles, graphe d'états, etc.) et la notion de *mode d'exécution* permet de spécifier les diverses façons avec lesquelles une tâche utilise une ou plusieurs ressources (figure 4).

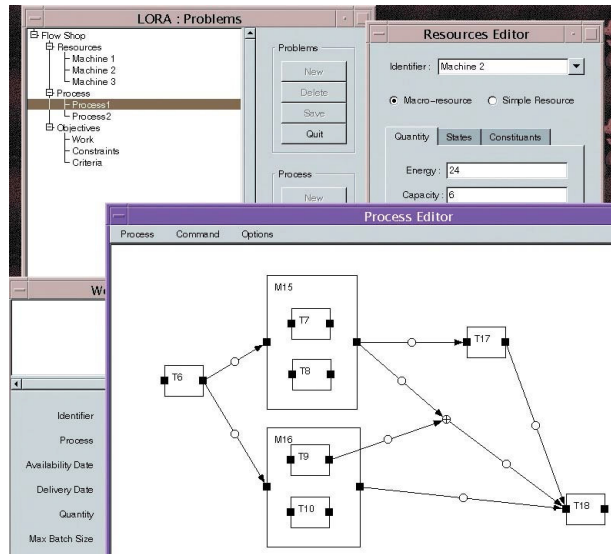


Figure 4 : Interface de LORA

2.3 Modélisation et optimisation de systèmes combinatoires

- **Elaboration de plannings de travail et affectation de personnels**

Pour résoudre le problème d'élaboration de plannings de personnel pour des compagnies aéronautiques ou aéroportuaires, nous avons proposé une approche de modélisation basée sur le concept de plage horaire [73, 95]. Il permet une représentation générique des tâches et des vacations et une gestion logique des relations temporelles par l'intermédiaire d'une algèbre d'intervalles. A partir de ce modèle, nous avons construit des méthodes heuristiques de construction de programmes de travail basée sur des algorithmes de listes. Pour valider ces méthodes et évaluer leurs performances, nous avons résolu de façon optimale, par programmation linéaire en variables mixtes, des problèmes académiques de génération de rotations pour le personnel navigant, technique et commercial.

Le problème de constitution d'équipages a en outre été résolu par décomposition. Pour réduire la complexité du problème, l'horizon temporel a été décomposé en sous-intervalles de temps (jours) et les équipages auxquels les rotations sont affectées sont constitués secteur par secteur et qualification par qualification. Pour résoudre chaque problème élémentaire d'affectation, une combinaison de deux méthodes classiques d'affectation, l'algorithme hongrois et le « bip match », a été proposée. Des tests sur des données réelles de compagnies aériennes de taille moyenne, avec des contraintes réglementaires différentes, ont permis de valider l'approche et d'envisager le déploiement du module de génération/affectation de rotations équipages pour certaines compagnies [48].

- **Planification de prise de vues pour un satellite agile**

Dans le cadre d'une collaboration avec GFI Consulting (convention CIFRE) et le CNES, nous avons travaillé sur un problème de planification de la mission d'un satellite dit « super agile » d'observation de la Terre (système Pléiades, figure 5).

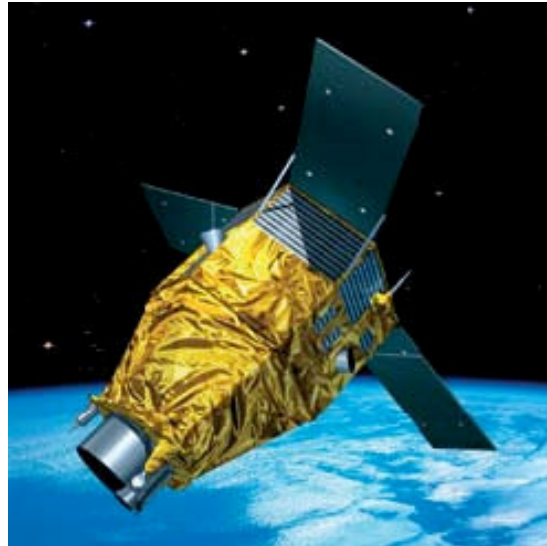


Figure 5 : Satellite optique Pléiades

Pour ce type de problèmes réels, fortement combinatoires, comportant des contraintes non classiques (stéréoscopiques par exemple) et dont les temps de calculs autorisés en pratique sont toujours très limités, on fait généralement appel à des méthodes approchées pour générer des solutions. Il est cependant important de pouvoir évaluer la qualité de ces solutions. Ainsi, nous proposons une approche exploitant des méthodes exactes pour le calcul de bornes supérieures afin de permettre l'évaluation de solutions et, éventuellement, de trouver de meilleures solutions [64]. Sur la base d'un modèle linéaire original, nous proposons une décomposition du problème et un processus de résolution par programmation linéaire généralisée (ou génération de colonnes) [42, 62, 65]. La décomposition du modèle permet de se ramener à la résolution itérative d'un programme linéaire relâché de taille raisonnable d'une part, et de problèmes classiques de recherche de plus longs chemins dans un graphe sans cycle d'autre part. Pour la recherche de chemins dans un graphe, on fait appel à des algorithmes de programmation dynamique basés sur l'utilisation d'étiquettes, généralement efficaces sur ce type de problèmes (figure 6).

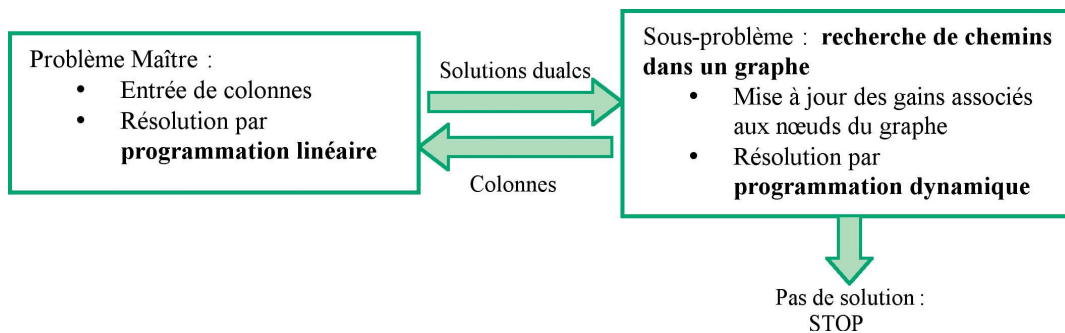


Figure 6 : Principe de résolution par génération de colonnes

La thèse de Catherine Mancel, « Modélisation et résolution de problèmes d'optimisation combinatoire issus d'applications spatiales », soutenue le 25 juin 2004, détaille les résultats de ce travail [23].

- **Optimisation de systèmes à événements discrets**

Enfin, dans le cadre de la coopération (PCP) avec le groupe MAC et le département d'Ingénierie de l'Université Los Andes à Mérida (Venezuela), les recherches sur l'optimisation de systèmes dynamiques à événements discrets (SED) ont abouti d'une part à l'extension aux SED du principe du minimum, d'autre part à la conception d'algorithmes de calcul symbolique basés sur ce principe et sur l'approche par programmation dynamique [34, 41, 68, 87]. Ces contributions ont été présentées en particulier dans la thèse de Juan Cardillo, soutenue à Mérida le 4 février 2004 [22].

3. Prospective

3.1 Gestion coopérative de réseaux d'activités

- **Pilotage intégré et gestion de stocks de chaînes logistiques**

La recherche initiée sur le pilotage intégré de chaînes logistiques sera poursuivie. La caractérisation et la formalisation des différents processus de pilotage seront poursuivies. Des modèles d'aide à la décision associés aux différents centres seront approfondis en intégrant les besoins contradictoires d'autonomie et de coordination. Les modèles des centres de décision d'entreprises communes à plusieurs chaînes logistiques seront renforcés. Parallèlement, la spécification d'une plate-forme logicielle distribuée simulant le fonctionnement d'une chaîne logistique et permettant de valider l'approche retenue sera entreprise. Elle permettra d'évaluer les performances relatives de chaque type de pilotage face aux aléas et à l'incertitude subies par les informations (méconnaissance, rétention,...) circulant dans les chaînes logistiques.

Un nouvel axe de réflexion sera engagé autour de la réactivité des processus de planification. Après avoir analysé les caractéristiques dynamiques (périodes de décisions, horizons de planification, de replanification, ...) et les indicateurs économiques pertinents des processus de planification et de replanification des activités d'un réseau d'entreprises, il s'agira d'élaborer des outils assurant la réactivité du processus de planification face aux perturbations issues du contexte local ou global. Il convient de souligner la double dimension technique et économique souhaitée pour ces outils pour assurer la qualité globale et locale de fonctionnement et mettre en évidence les gains que chaque partenaire retire de la coopération (relations gagnant-gagnant).

L'approche par la théorie des jeux stratégiques (ou non-coopératifs) va être développée pour analyser les négociations de contrats entre fournisseurs et producteurs ou détaillants au sein d'une chaîne logistique dans le cas d'information asymétrique, avec ventes perdues (« lost sales ») et possibilité d'approvisionnement externe (outsourcing). En amont de la négociation, le problème de conception de chaînes logistiques va être abordé par la théorie des jeux coopératifs. En gestion de stocks, des processus de demande plus complexes (« compound Poisson processes ») vont être étudiés, ainsi que le phénomène d'amplification de la variance des commandes de l'aval à l'amont d'une chaîne logistique (effet « bullwhip »). Notons qu'à l'issue de ce travail à court terme, il est probable que l'approche de gestion des stocks par la théorie des jeux ne soit pas poursuivie.

- **Coopération inter-entreprises**

Concernant le thème de coopération inter-entreprises pour la production à la commande, deux axes de travaux restent à développer :

- face au problème de l'explosion combinatoire que présente la recherche de scénarios de renégociations possibles pour absorber la création ou la modification d'un cadre de décision, nous envisageons une stratégie simple basée sur un système de priorités entre clients, celles-ci pouvant éventuellement être pondérés selon la proximité temporelle de la réalisation d'un cadre de décision ;
- le modèle qui a été jusqu'à présent étudié se limite au cas certes important mais particulier de flux non réentrants (pas de cycle dans le graphe des flux de produits). Il reste donc à étudier le cas d'une situation de sous-traitance, qui confère un double rôle aux partenaires (d'émetteur et de récepteur de flux de produits) et qui oblige à concevoir des

interfaces et des modalités de coopération adaptées, afin de ne pas créer artificiellement deux processus de coopération (un pour le flux direct et un pour le flux de retour).

Une nouvelle collaboration avec l'Université Los Andes à Mérida, Venezuela, a débuté dans le cadre d'un projet ECOS-Nord V05M01 (2005-2008). Ce projet porte sur la coordination par négociation de procédés industriels distribués sur plusieurs sites. La filière industrielle étudiée est celle de la fabrication de ciment au Venezuela.

- **Pilotage d'activités de service et d'ingénierie**

L'organisation des activités dans les ateliers de maintenance automobile pour les particuliers, nous a permis d'identifier une problématique typique du pilotage d'activités de service. Il reste à valider l'approche proposée (résolution d'un problème d'ordonnement de tâches non préemptives avec contraintes énergétiques puis affectation détaillée des opérateurs aux activités) selon deux axes :

- sur le plan de la programmation du modèle, il reste à évaluer les performances et les limitations respectives de solutions utilisant exclusivement la programmation logique par contraintes (PLC) pour résoudre les deux types de problèmes ou combinant PLC et programmation mathématique lorsqu'un des sous-problèmes relève directement de l'optimisation ;
- sur le plan de l'utilisation du modèle, il reste à déterminer les scénarios de coopération et les stratégies de résolution les plus robustes face aux aléas (remise en cause des dates par le client et/ou diminution imprévue des capacités des ressources sur certaines périodes) ; ce problème est également couplé à la conception des interfaces utilisateur pour ce type d'application.

Une collaboration récente avec Airbus et EADS-CCR a permis de débiter des recherches sur l'aide au pilotage d'activités d'ingénierie pour le développement distribué d'un système complexe. De nos jours pour maîtriser la complexité structurelle et fonctionnelle d'un système complexe tel qu'un avion, le programme de développement est alloué à différents plateaux techniques, intégrant chacun l'ensemble des compétences liées au développement d'un sous-système, pour une durée de projet limitée. Le plateau constitue une forme de réponse de l'ingénierie des systèmes au problème de la réduction des cycles et des coûts de développement. Cependant, la structuration et le pilotage des plateaux soulèvent des problèmes non triviaux. Trois axes de recherche sont envisagés. Le premier porte sur le management global du programme et la structuration préalable en plateaux à travers notamment la gestion des relations inter-plateaux : comment générer un ensemble de plateaux recouvrant au mieux l'ensemble des activités de développement, minimisant a priori les interfaces et les contraintes de séquençement entre plateaux ? Le deuxième axe concerne le suivi, le pilotage et la coordination des activités au sein de chaque plateau : il s'agit de définir des processus de suivi et de prise de décision (ex : revues périodiques, réunions de crise) permettant de régler les aléas du développement, par la redéfinition des activités, la modification des ressources allouées et la génération de nouvelles contraintes inter ou intra plateaux. Le dernier axe consiste à proposer des outils permettant de s'appuyer sur les modèles proposés dans les axes précédents pour faciliter la prise de décision et la coopération au sein d'une organisation multi-plateaux (ex : outils de type tableaux de bord intégrant des modèles de simulation pour la génération de scénarii de développement possibles, solveurs de contraintes pour l'ordonnement des activités et l'affectation des ressources métier).

3.2 Ordonnement

- **Ordonnement agrégé / ordonnement détaillé**

Les travaux concernant l'ordonnement agrégé seront poursuivis par l'étude de nouveaux mécanismes d'agrégation conduisant à une performance accrue du module d'ordonnement agrégé. Cette étude portera notamment sur l'agrégation du travail (notion de macro-opération) et sur l'agrégation des groupes de ressources alternatives (notion de macro-ressource). L'utilisation et l'amélioration d'indicateurs de charge devraient permettre de proposer des mécanismes d'agrégation pertinents. La validité de ces nouveaux modèles agrégés sera évaluée à partir d'expérimentations numériques représentatives de problématiques industrielles.

- **Ordonnement robuste**

En ce qui concerne le traitement de l'incertitude et le thème de l'ordonnement robuste basé sur la notion de dominance, la généralisation des résultats obtenus à des problèmes plus complexes de type « job shop » est en cours. Une autre recherche concerne l'exploitation d'un ensemble de solutions dominantes déterminé a priori, dans une procédure d'ordonnement réactif. Il s'agit d'adapter l'ensemble initial des solutions en fonction des événements prévus ou contingents survenant lors de l'exécution de l'ordonnement. Dans ce cadre, une relation avec le Laboratoire de Robotique et d'Intelligence Artificielle d'Alger est amorcée.

- **Ordonnement et affectation**

Pour l'analyse et la résolution de problèmes d'ordonnement avec flexibilité de ressources, les points suivants devraient être abordés :

- Evaluation de la méthode de recherche arborescente tronquée LDS proposée sur des problèmes types d'ordonnement et d'affectation (« flow shop hybride », « job shop flexible », « RCPSP multi-modes »).
- Développement d'une nouvelle méthode de recherche arborescente tronquée basée sur CDS (« Climbing Discrepancy Search ») dans laquelle le compteur de divergences est réinitialisé dès qu'une meilleure solution est trouvée.
- Etude bibliographique sur les différentes méthodes de recherche arborescente tronquée (« recovering beam search », « branch-and-greed », etc.) ;
- Extension de mécanismes de propagation de contraintes en se basant sur des recherches de plus longs chemins dans des graphes de contraintes (algorithmes de type « 3-consistance »). Ce point devra comporter une phase importante de validation expérimentale sur les benchmarks de problèmes avec flexibilité de ressources déjà cités ci-dessus.
- Intégration des nouveaux mécanismes de propagation au sein d'une procédure de résolution.

En outre, nous souhaitons pouvoir étendre l'application des méthodes de résolution mises en œuvre dans le cadre de la planification de missions spatiales à d'autres domaines, en considérant par exemple des problèmes d'ordonnement de projet ou d'ateliers comportant des contraintes de fenêtres temporelles d'exécution et de temps de préparation entre les tâches. Les approches développées s'inscrivent en effet dans la lignée d'un certain nombre de travaux récents, qui mettent en évidence l'utilité des méthodes basées sur une coopération de méthodes exactes comme la programmation linéaire en nombres entiers avec des techniques de réduction ou de simplification de l'espace de recherche (décomposition des modèles, techniques de propagation de contraintes), pour aborder les problèmes d'optimisation

combinatoire de grande taille.

3.3 Modélisation et optimisation de systèmes combinatoires

- **Elaboration de plannings de travail et affectation de personnels**

Les prochains travaux sur l'élaboration de plannings de personnel pour des compagnies de transport aéronautique viseront à construire une méthode approchée performante de construction de rotations, applicable à des problèmes de dimension réelle. D'autre part, des études vont être entreprises pour intégrer des contraintes complexes (repos post-courrier, pré-acheminements,...) aux méthodes déjà élaborées pour résoudre les problèmes de constitution d'équipages.

- **Logistique des déchets**

Des travaux préliminaires ont été engagés sur le domaine de la logistique des déchets ménagers. Dans ce domaine la place de l'homme est prépondérante (à la fois en tant qu'exécutant de l'activité et en tant que source possible d'incertitudes supplémentaires). De plus on est confronté la nécessaire prise en compte de nombreux critères : économiques, qualité de service, sociaux, et environnementaux. Ces premiers travaux ont permis d'identifier des interlocuteurs à l'ADEME et dans une communauté d'agglomération en charge de la collecte des déchets ménagers. Des problèmes plus précis sont à l'étude comme la construction de tournées pour les véhicules ou l'évolution dynamique des tournées (nouveaux habitants, augmentation du volume de collecte). Un travail sur les indicateurs liés aux collectes doit également être entrepris. Ce travail sera mené en collaboration avec le LGP de Tarbes.

- **Modélisation du trafic aérien**

Des travaux devraient également être poursuivis dans le cadre d'une collaboration avec Eurocontrol Experimental Centre. A la suite du projet A2 (« Advanced Airspace ») ayant permis d'explicitier les connaissances sur la gestion du trafic aérien (ATM), Eurocontrol souhaite désormais lancer un nouveau projet intitulé METIS (« Model for Explaining Theoretical Interactions – in the air traffic management – System »). Notre participation dans ce projet consisterait à nous pencher plus en profondeur sur la modélisation basée contraintes d'un système de gestion du trafic aérien européen de 2020. Le travail devrait ainsi porter sur une étude comparative de modèles de représentation des contraintes (variables) mixtes (numériques, symboliques, entières, continues) et conditionnelles. Ce projet devrait permettre, à terme, la conception d'un processus interactif d'aide à la décision, capable d'analyser les conséquences d'une décision, l'explication et la réparation d'une incohérence. Les axes de travail concernent la modélisation et la propagation des contraintes mixtes et conditionnelles, avec une application privilégiée qui est la modélisation, la conception, la configuration d'un nouvel ATM.

- **Recherche arborescente tronquée**

Un travail de recherche a été initié en collaboration avec l'Unité Recherche Opérationnelle pour l'Industrie de l'Ecole Polytechnique de Tunisie sur les méthodes de recherche arborescente tronquée. A partir de la méthode originale LDS, de nouvelles méthodes peuvent être proposées afin d'accélérer la recherche de solutions admissibles. Des expérimentations peuvent être menées sur des problèmes de satisfaction de contraintes aléatoires pour montrer l'intérêt de ce type d'approche. Des adaptations pour des problèmes combinatoires pratiques (ordonnancement par exemple) devront être effectuées.