



**HAL**  
open science

## Contribution à l'ordonnancement et la planification de ressources humaines

Odile Bellenguez-Morineau

► **To cite this version:**

Odile Bellenguez-Morineau. Contribution à l'ordonnancement et la planification de ressources humaines. Recherche opérationnelle [math.OA]. Université de Nantes, 2015. tel-02526237

**HAL Id: tel-02526237**

**<https://hal.science/tel-02526237>**

Submitted on 31 Mar 2020

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

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

UNIVERSITÉ DE NANTES

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE  
L'INFORMATION ET MATHÉMATIQUES

---

# Contribution à l'ordonnancement et la planification de ressources humaines

---

Mémoire présenté le 30 juin 2015 par

Odile Bellenguez-Morineau

en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches

devant le jury composé de

Christian ARTIGUES	Directeur de Recherche, LAAS-CNRS, Toulouse	Rapporteur
Jean-Charles BILLAUT	Professeur, Université de Tours	Rapporteur
Federico DELLA CROCE	Professeur, École Polytechnique de Turin	Rapporteur
Erik DEMEULEMEESTER	Professeur, Université de Louvain	Examineur
Christelle GUÉRET	Professeur, Université d'Angers	Examinatrice
Nasser MÉBARKI	Maître de Conférences, HdR, Université de Nantes	Examineur

Habilitation préparée au sein de l'Institut de Recherche en Communications et  
Cybernétique de Nantes (UMR CNRS 6597)

À Antoine,  
À Clément,  
avec l'indéfectible amour d'une maman.

Je voudrais tout d'abord remercier Christian Proust, Jean-Charles Billaut, Emmanuel Néron, Ameer Soukhal, Patrick Martineau, Vincent T'Kindt et bien d'autres qui ont su partager leur passion et leurs convictions. Parce qu'on n'apprend bien qu'auprès de gens passionnés, parce que chacun, volontairement ou non, y va toujours un peu de son effet Pygmalion, qu'ils sachent qu'ils m'ont donné envie de faire de la recherche, car j'ai avant tout perçu ce métier à travers l'ambiance chaleureuse et motivante de l'équipe, dans laquelle on pouvait encore prendre le temps et où il faisait bon vivre en tant que doctorante. Je leur en garde le plus grand respect et une sincère amitié. Comme beaucoup de personnes que je croise, j'exerce ce métier avec des hauts et des bas, mais aussi une désorganisation chronique face à trop de demandes et beaucoup de frustration devant ce qui n'est pas accompli, heureusement surtout avec une envie de découvrir, de comprendre et de partager tout à fait intacte.

Merci infiniment à Christelle Jussien-Guéret, pour m'avoir accueillie dans l'équipe SLP en 2007, ainsi que pour nos travaux depuis. Je crois savoir qu'il ne lui a pas toujours été facile de faire face à ma frénésie et mon impatience et je lui sais gré de la patience qu'elle manifeste toujours et de la façon dont elle me permet encore d'enrichir mon point de vue et ma capacité d'écoute, même à distance. A son contact, j'ai, à n'en pas douter, progressé sur ma capacité à relativiser et garder un certain optimisme (et sur mon jeu au badminton), même si je sais qu'il reste des marches à gravir dans ce domaine. Merci plus largement, à de nombreux collègues pour leur retour et nos échanges, notamment Chams Lahlou, Bruno Castanier, Olivier Péton, Fabien Lehuédé, Philippe Castagliola... pour leur ouverture et nos échanges...parce que je crois que ce sont les échanges et la confrontation des points de vue qui font grandir chacun.

Bien entendu, je voudrais remercier chaleureusement Federico, Christian et Jean-Charles d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce manuscrit. Guidée d'abord par beaucoup d'admiration, je suis heureuse de nos échanges, et je leur sais gré des nombreux enrichissements survenus grâce à nos échanges et du temps qu'ils m'ont accordé. J'adresse un chaleureux merci également à Erik, Nasser et Christelle d'avoir accepté de se joindre à ce jury. Une fois encore, ce sont souvent les rencontres et les temps d'échange qui nous font grandir et avancer, qui ouvrent de nouvelles portes.

Enfin, je voudrais remercier sincèrement tous ceux avec qui j'ai collaboré lors de ces travaux, pour tous nos échanges et pour leur indulgence à mon égard, je sais qu'il m'est parfois difficile d'être rationnelle, que je vis sans conteste ce métier avec un degré d'émotions sans doute beaucoup trop fort et décalé, mais ce sont également les attachements sincères qui m'y ramènent toujours. Merci encore donc à Emmanuel Néron en tout premier lieu, mes trois années de thèse ont été un tremplin exemplaire, un équilibre parfait à mon sens entre exigence et sérénité. Merci à Eric Pinson et David Rivreau, Carlos Montoya, Martin Géhan, chaque rencontre est un nouvel apprentissage sur le plan scientifique et humain. Merci à Agnès Le Roux et Tanguy Lapègue pour nos collaborations également, mais aussi pour bien d'autres échanges, à n'en pas douter j'ai appris beaucoup et nous avons refait et sauvé le monde plus d'une fois, parfois même sans chamallow. Merci à tous et à l'ensemble des autres participants pour les soirées bières, les parties de badminton,

les barbecues évidemment. Enfin, bien entendu parmi eux, merci à Damien Prot, pour tous nos travaux, toutes les idées devant un tableau blanc qui m'ont remotivées plus d'une fois, pour la profusion de pistes qu'il reste encore à explorer, et merci pour nos échanges dans la rédaction de ce mémoire, mais aussi dans tant d'autres projets et partages que ces pages n'en finiraient pas...

Au-delà des travaux scientifiques, les dernières années écoulées se sont accompagnées d'un temps pour me pencher sur la valeur de mes choix et prendre du recul sur le sens que j'accorde aux choses. Rédigée donc en une de ces périodes de vie charnières que l'on connaît parfois, cette brève synthèse ne serait pas tout à fait la même, et ne serait peut-être tout simplement pas, sans tous ceux que j'ai croisés dans d'autres contextes, tous ceux qui m'ont un moment influencée, me permettant de faire grandir mes idées, de m'ouvrir à bien d'autres lectures et champs de réflexion, d'autres modes d'expression, bien d'autres passions, ceux dont le regard m'accompagne encore aujourd'hui et qui restent si souvent une grande source d'inspiration.

Parce que la vie nous offre parfois de belles rencontres, qui nous changent et parce qu'elle nous éloigne aussi parfois de ces gens dont le regard compte tant, je dédie modestement ces lignes à tous ceux qui m'ont tant apporté, qu'ils soient encore proches ou plus inaccessibles à présent. Parce qu'on ne voit bien les rayures de son masque que dans le regard de l'autre, merci à Damien, à Aurély, à Karine, à Marie et Marie, à Mike, à Charlie, à Marie-Flore, à Jawad, à Marianne et toute la troupe de théâtre, pour une aventure humaine extra-ordinaire, à Vincent, pour cette plongée dans le monde sans parole du dessin, à Catherine, pour chaque pierre de l'édifice que nous avons posées... Et au-delà de tout, mes plus chères pensées aux quatre petits mousquetaires, Clément, Antoine, Clément et Cédric, qui me font rire, me bousculent, m'émeuvent au plus haut point et me poussent à grandir sans être adulte plus souvent que nécessaire.

*"Sachez vous éloigner car, lorsque vous reviendrez à votre travail, votre jugement sera  
plus sûr"*

*"Savoir écouter, c'est posséder, outre le sien, le cerveau des autres."*

Léonard de Vinci

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Parcours depuis le doctorat, orientation des travaux</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Introduction générale et Cadre des projets</b>	<b>10</b>
2.1	L'ordonnancement . . . . .	11
2.2	Les ressources . . . . .	12
2.3	Les problèmes de planification du personnel . . . . .	13
2.4	Motivation et cohérence du projet . . . . .	15
2.5	Partenariats et contextes applicatifs . . . . .	16
2.5.1	Groupement Métalia . . . . .	17
2.5.2	West Speed-dating . . . . .	18
2.5.3	Biotrial . . . . .	18
2.6	Plan du manuscrit . . . . .	19
<b>I</b>	<b>Ordonnancement</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>Problèmes d'atelier</b>	<b>23</b>
3.1	Introduction . . . . .	24
3.2	Complexité des problèmes à machines parallèles . . . . .	24
3.2.1	Cas des problèmes avec préemption . . . . .	26
3.2.2	Résultats de complexité . . . . .	28
3.3	Problèmes à gammes complexes . . . . .	28
3.3.1	Contraintes spécifiques . . . . .	28
3.3.2	Evaluation par défaut . . . . .	30
3.3.3	Résolution approchée . . . . .	31
3.4	Conclusion et perspectives . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Problème de gestion de projet</b>	<b>35</b>
4.1	Introduction . . . . .	36
4.2	Gestion de projet multi-compétence . . . . .	37
4.3	Complexité . . . . .	38
4.4	Résolution exacte . . . . .	38
4.5	Résolution approchée . . . . .	40
4.6	Conclusions et discussions . . . . .	41

<b>II</b>	<b>Planification de Ressources Humaines</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>Problèmes de planification de ressources humaines sans contraintes légales</b>	<b>45</b>
5.1	Introduction . . . . .	46
5.2	Positionnement des problèmes de rendez-vous . . . . .	46
5.3	Complexité . . . . .	49
5.4	Méthodes de résolution . . . . .	50
5.4.1	Résolution de problèmes d’ordonnancement de rendez-vous statique	50
5.4.2	Résolution d’un cas dynamique . . . . .	51
5.5	Conclusions et discussions . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Problèmes de planification de ressources humaines avec contraintes légales</b>	<b>54</b>
6.1	Introduction . . . . .	55
6.2	Problèmes de planification d’horaires d’employés . . . . .	55
6.3	Problèmes incluant l’affectation de tâches . . . . .	56
6.4	Shift Desing Personnel Task Scheduling Problem . . . . .	57
6.4.1	Méthodes en deux phases . . . . .	58
6.4.2	Approche intégrée . . . . .	59
6.5	Conclusions et perspectives . . . . .	59
<b>7</b>	<b>Conclusions et perspectives de recherche</b>	<b>61</b>
<b>8</b>	<b>Curriculum Vitae</b>	<b>70</b>

# Chapitre 1

## Parcours depuis le doctorat, orientation des travaux

---

Après un parcours en tant qu'élève ingénieur à Polytech'Tours, le Laboratoire d'Informatique de l'Université de Tours (EA 6300) m'a accueillie pour une thèse de doctorat soutenue en 2006, et une année en tant qu'ATER. J'ai eu la chance à ce moment-là de travailler au sein de l'équipe Ordonnancement et Conduite, auprès de ceux qui m'avaient donné le goût de la recherche. Les travaux effectués durant cette période portaient sur un problème de gestion de projet multi-compétence, sur lequel je reviendrai dans ce document. Ce problème qui généralise un problème classique de gestion de projet, le Resource-Constrained Project Scheduling Problem, a été investigué via différentes méthodes de résolution. Cela m'a permis de m'approprier différentes approches issues de la Recherche Opérationnelle. Mes travaux depuis se situent toujours dans le giron de ce champ thématique.

Depuis 2007, je suis enseignant-chercheur à l'Ecole des Mines de Nantes. Le rattachement de cette école à l'institut Mines-Télécom sous tutelle du Ministère chargé de l'industrie encourage un lien vers l'industrie sur lequel je reviendrai à travers les pages qui suivent. En terme de laboratoire de recherche, j'ai rejoint l'Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes (IRCCyN, UMR 6597), où je suis intégrée à l'équipe Systèmes Logistiques et de Production. Une large part des travaux de cette équipe est basée sur des approches issues de la Recherche Opérationnelle, en lien avec différents types d'application mis en avant. Les trois thèmes actuellement retenus pour l'organisation des travaux proposés sont :

- Maintien et surveillance des systèmes
- Ordonnancement et planification de la production et des services
- Conception et optimisation des réseaux logistiques et du transport

Les champs d'investigation, partant des applications et des besoins du tissu industriel partenaire couvrent un très large spectre, mais l'objectif principal reste de proposer des modélisations et des méthodes de résolution pour adresser des problèmes d'aide à la décision. Les deux derniers thèmes notamment s'intéressent à la caractérisation et la résolution de problèmes d'optimisation combinatoire. L'équipe crée des partenariats au sein de divers secteurs d'activité. Les domaines d'application que l'on trouve principalement sont centrés sur la chaîne logistique, depuis sa conception pour l'implantation, jusqu'au réseau de distribution, en passant par l'organisation, l'optimisation, la surveillance et la maintenance des moyens de production. Cependant, certaines problématiques peuvent être aisément élargies à la gestion des services : Services à la personne, système de santé, conception et pilotage de réseau de distribution d'énergie, réseaux de transports, etc...

Dans ce cadre, mes travaux de recherche se sont tout à fait naturellement intégrés à l'axe Ordonnancement et Planification, pour venir le renforcer. Mes contributions se centrent essentiellement sur l'ordonnancement et la planification de personnel. Les partenariats industriels et le transfert de technologie étant très fortement encouragés par l'Ecole des Mines de Nantes, l'essentiel de mes travaux partent de problématiques réelles et de besoins directs de caractérisation et résolutions de problèmes industriels.

Les champs d'application sont variés, issus des rencontres et des collaborations, dans

un esprit de dynamisation du tissu industriel et de valorisation des avancées qui doivent découler de la recherche fondamentale. Je suis personnellement profondément convaincue de l'importance de telles avancées (industrielles) pour la mutation du tissu industriel français et sa future compétitivité. C'est donc dans cette optique par exemple que j'anime un programme de formation pour les étudiants de l'École des Mines de Nantes et essaie de transmettre aux étudiants autant de points d'entrée vers la recherche que faire se peut, ainsi que l'importance de leur rôle en tant que futurs professionnels dans la vulgarisation des approches et leur implantation réelle. C'est également à cette fin que je tente d'accompagner les doctorants dans leur ouverture aux réalités industrielles et à leur tâche première de compréhension des environnements pour en dégager des modélisations pertinentes, mais également être porteur de la vulgarisation nécessaire à une meilleure compréhension des avancées académiques par les industriels. Le triptyque Valorisation-Enseignement-Recherche étant à mon sens à lire de chacune de ses composantes vers les autres : la valorisation vient interpeler la recherche par de nouvelles problématiques et l'identification de verrous à lever et vient nourrir l'enseignement par les cas d'application permettant d'illustrer la pertinence des approches ; l'enseignement doit venir nourrir la valorisation notamment par la formation de futurs acteurs à même de faire évoluer les systèmes professionnels et vient soutenir la recherche en la rendant davantage accessible et déterminante. Enfin, la recherche doit être la colonne vertébrale de la valorisation et de l'enseignement, pour l'innovation de demain et les compétences et connaissances des étudiants.

Si les projets de valorisation sont aujourd'hui fermement mis en avant, il est cependant fondamental que ces projets de transfert direct laissent également la place à des recherches théoriques plus poussées, même sans applicabilité visible à court terme. En effet, le développement de ces méthodes ad hoc, très finement paramétrées et parfois trop peu transposables, ne permet de poser que très peu de jalons pertinents pour les avancées profondes de la communauté et les potentielles révolutions scientifiques et technologiques à venir.

Pour cette raison, je cherche toujours à travers les projets à garder autant que possible un équilibre entre les besoins applicatifs et les avancées plus fondamentales, qui naissent en général de problématiques plus épurées. Les travaux autour de la complexité, les recherches de conditions de dominance en sont quelques exemples.

Dans un contexte qui s'accélère, où les charges diverses se multiplient, où même l'enseignement connaît des mutations profondes et des réformes à un rythme nécessitant un investissement fort, l'équilibre n'est pas toujours facile à trouver (ou à conserver) entre les projets applicatifs et les recherches fondamentales, et nombres d'idées restent inexplorées. Inexplorées principalement par manque de temps, mais également par manque de capacité à s'y investir pleinement et sur un horizon long lorsque les ressources, les personnels impliqués, connaissent un contexte aussi instable et précaire que celui actuel. Fort heureusement, la curiosité intellectuelle et la richesse des échanges avec certains collègues viennent parfois contre-balancer le manque de temps qui pourraient faire sacrifier l'un au profit de l'autre, encouragé par un système de financement de la recherche sans vision à

long terme et aujourd'hui entravé de bien trop de contraintes administratives.

Afin d'alimenter au mieux le triptyque Recherche-Enseignement-Valorisation que j'évoquais, il me semble essentiel de garder en tête l'objectif du métier d'Enseignant-Chercheur, qui ne peut s'évaluer que sur le long terme, et peut-être de se recentrer sur l'une des composantes trop souvent oubliée : la créativité. La créativité doit être au service de la création de connaissances nouvelles dans la recherche, la création de compétences nouvelles des étudiants par l'enseignement et la création de valeur, présente et à venir, pour le tissu économique.

*"The intuitive mind is a sacred gift and the rational mind is a faithful servant. We have created a society that honors the servant and has forgotten the gift."*

Albert Einstein

## Chapitre 2

# Introduction générale et Cadre des projets

---

Comme on peut le voir dans le livre blanc de la Recherche Opérationnelle (ROADEF (2011)), cette discipline se retrouve partout, dans tous les domaines et tous les secteurs, dans toutes les entreprises, de toute taille. Les applications et les problématiques sont nombreuses, variées, et l'on peut identifier de très nombreux leviers pour faire évoluer les entreprises. Un rapide état des lieux permet d'esquisser l'ampleur de ce qu'il reste à faire. En effet, de nombreux défis industriels sont encore à adresser et d'autres émergeront, à n'en pas douter. Parmi les différents champs d'investigation que l'on peut retrouver, j'ai toujours eu un intérêt particulier pour l'utilisation et l'optimisation des ressources à travers le temps. Il me semble que la rationalisation au cours du temps de l'utilisation des moyens constitue un enjeu majeur, quelle que soit la nature des moyens considérés. Cela rejoint probablement des préoccupations personnelles de gestion de mon temps toujours trop limité pour jongler parfaitement entre les différentes choses sur lesquelles j'aime à m'investir.

Dans ce cadre, un grand domaine de problèmes m'intéresse particulièrement. L'ordonnancement, qui se focalise sur l'allocation des ressources du point de vue opérationnel, est un champ d'investigation virtuellement inépuisable que l'on pourrait englober sous la question générique : aux vues de ce qu'il y a à faire, ou de ce qui est supposé à faire, et des ressources dont on dispose, comment organiser au mieux ce que le système va faire ? C'est une problématique que l'on retrouve là aussi à toutes les échelles, faisant ainsi varier la notion de système à prendre en compte, dans bien des champs d'application personnels ou professionnels.

## 2.1 L'ordonnancement

Les approches proposées autour des problématiques d'ordonnancement constituent donc un premier moyen de répondre à cette famille de questions, pour mettre au mieux le temps à profit. Ainsi, on pourra citer des définitions classiques bien connues telles que :

"Scheduling deals with the allocation of scarce resources to tasks over time. It is a decision-making process with the goal of optimizing one or more objectives" (Pinedo (2002)).

Pour justifier l'intérêt et la pertinence des problématiques réelles relevant du champ de l'ordonnancement, d'aucun citerait aussi tout simplement la célèbre devise "time is money". Si la majorité des enjeux industriels relèvent toujours peu ou prou de conséquences économiques, les critères pris en compte peuvent être bien plus larges que le coût direct (impact environnemental, énergétique, managérial ou matériel par exemple). En revanche, il s'agit toujours d'une mise à profit des ressources à travers le temps, profit que l'on peut décliner au sens de toute fonction d'utilité selon les cas. En ordonnancement, cela reviendra à définir la fonction objectif permettant de mettre en avant cette mise à profit au sens des différentes problématiques. Certaines fonctions objectif portent uniquement sur les délais : le délai global d'achèvement de l'ensemble des tâches (minimisation du makespan), ou l'achèvement propre de chaque tâche (via la minimisation des dates

d'achèvement ou la minimisation du retard par exemple). D'autres portent uniquement sur les couts (minimisation du cout global de production, ou du cout de stockage, cout de production, ou encore maximisation des gains...) D'autres fonctions objectif portent sur des critères sociaux ou environnementaux : minimisation de l'impact carbone ou de la consommation énergétique, ou encore maximisation de la qualité de service par exemple. La littérature en ordonnancement foisonne ainsi de fonctions objectif dédiées, essayant de capturer au plus juste la fonction d'utilité pertinente afin de mesurer la qualité de la solution par rapport aux attentes du (ou des) décideur(s) dans le cadre des problématiques abordées.

Dans tout problème d'ordonnancement, on cherche donc à déterminer l'affectation des ressources nécessaires à une exécution, ainsi que la date retenue pour cette exécution. Allocation dans le temps des moyens de production dans les problèmes d'atelier, attribution de ressources physiques ou virtuelles dans l'ordonnancement sur grille de calcul, management des ressources dans la gestion de projet sont en sont des exemples. De très larges familles de problèmes peuvent ainsi être considérées.

Toutes cependant nécessitent l'identification du travail à réaliser. Selon les cas, celui-ci est décomposé en tâches, en travaux (ou jobs), ou en activité. Le vocable peut varier selon les champs investigués, mais il s'agit toujours de délimiter les sous-parties de la réalisation globale, dont les besoins en ressources et les contraintes propres (date de début au plus tôt, délai de péremption, ou date d'échéance par exemple... ) peuvent être caractérisés. Ces tâches, ou activités, correspondent ainsi à une consommation de ressources dans la solution proposée, qui est réalisable si les contraintes sont respectées.

## 2.2 Les ressources

Le point central des problèmes auxquels nous nous intéressons porte sur l'optimisation du temps, et par là même sur l'attribution des ressources à travers le temps. La compréhension et la caractérisation d'une problématique doit donc amener à définir les ressources mises en jeu. Les ressources considérées peuvent être de nature différentes et donner lieu à des contraintes diverses. Elle peuvent, par exemple, être renouvelables, i.e. libérées après leur utilisation, ou non renouvelables, i.e. consommées par leur utilisation. Elles peuvent également être sujettes à diverses contraintes telles que par exemple des besoins de maintenance ou autre indisponibilités, des cadences ou capacités variables, des incompatibilités, des temps de montage, etc... La multitude de travaux de la littérature montre bien l'étendue de ce qui peut être considéré.

Parmi l'ensemble des ressources renouvelables que l'on peut considérer, il semble pertinent d'établir une distinction entre les ressources matérielles et les ressources humaines. Un vaste panel de problèmes, pour certains largement adressés depuis des décennies, sont uniquement centrés sur des ressources matérielles, de type machines, processeurs, robots, engins, etc... Cependant, même pour ces derniers, les problématiques réelles ayant

donné naissance à ces modèles, doivent tenir compte d'affectation ou d'interaction avec des ressources humaines. Ainsi, pour un problème de production d'atelier par exemple, on aura des opérateurs pour régler les machines, assister la production ou déplacer les composants. Même dans un site de production totalement automatisé des interventions humaines régulières ont lieu pour contrôler, maintenir et piloter le système lors de certaines étapes. Si les ressources humaines ne sont pas intégrées aux modèles des problèmes d'ordonnancement modélisés, cela tient en général au fait que ces aspects sont traités en amont par le ou les décideur(s). En effet, soit les horaires de présence sont tout à fait figés ou prédéfinis avant l'étape de construction de l'ordonnancement, soit la latitude sur les ressources humaines est considérée suffisante pour ne pas venir contraindre le problème d'ordonnancement de la production. Le décideur considère alors qu'il est toujours possible de trouver une personne à affecter et cette part de la décision sera par conséquent arbitrer en aval.

En parallèle de ces problèmes d'ordonnancement qui écartent ou externalisent la gestion des ressources humaines, on trouve une littérature abondante traitant directement des problèmes de planification de personnel.

## 2.3 Les problèmes de planification du personnel

En effet, certains problèmes s'intéressent directement et explicitement à l'affectation de ressources humaines, comme cela peut être le cas pour les problèmes d'emploi du temps ou de planification de personnel. Ces problèmes mettent alors en évidence des contraintes propres aux ressources humaines relevant du cadre législatif ou managérial qu'on ne rencontre pas lorsque l'on considère des ressources matérielles uniquement. Historiquement, la gestion des recrutements et des horaires était ainsi très majoritairement décorrélée des aspects ordonnancement du travail, i.e. de l'affectation aux tâches. Cela permettait d'adresser les premiers par le biais de la gestion du personnel, tandis que les seconds relevaient de décisions opérationnelles. Ceci a le mérite de simplifier grandement la quantité d'information à prendre en compte et l'ampleur des décisions à arrêter à la fois par un décideur du point de vue métier. D'un point de vue modélisation, cela limite également le nombre et la nature des contraintes à considérer à chaque étape de décision.

Un rapide tour d'horizon des travaux fait état de différentes problématiques relatives à la planification du personnel. Ces préoccupations tout d'abord issues des métiers du service, font maintenant écho à l'évolution du contexte socio-économique. Prise en compte des coûts des personnels, meilleur dimensionnement d'équipe, contrats à temps partiels, recrutements temporaires sont maintenant à intégrer. Mais également diversité des profils, des parcours et des aspirations des acteurs... tous ces aspects font aujourd'hui de la gestion des personnels un enjeu majeur.

Ainsi, la maîtrise des coûts intègre maintenant une utilisation raisonnée de toute les ressources, y compris des acteurs de l'entreprise. La pérennité de l'entreprise à long terme passe par un dimensionnement juste mais également par une prise en compte de chacun,

au mieux de ses capacités, de ses aspirations, de ses choix et contraintes personnels, pour concourir à un confort de travail assurant l'implication des personnels, la coordination, la progression et l'efficacité sur le long terme. Toutes ces raisons amènent de nombreux chercheurs à se pencher sur la problématique des ressources humaines et à en élargir le périmètre.

Parmi les problématiques explorées, les ressources humaines peuvent être prises en compte sur tout horizon de décision, avec différents degrés de granularité, mais également différents enjeux. Sur un plan stratégique, il est tout d'abord pertinent d'adresser la question du dimensionnement des équipes, ainsi que de leur constitution, en terme de profil par exemple. Celui-ci peut d'ailleurs tout à fait évoluer si l'on prend en compte des questions de formations du personnel sur l'horizon stratégique. A moyen terme, c'est-à-dire sur le plan tactique, on peut rencontrer des questions telles que celle des disponibilités, par la gestion globale des congés et formations d'un ensemble de travailleurs cohérent, ou telles que celles de la répartition s'il existe plusieurs services, équipes ou projets. Enfin, d'un point de vue opérationnel, des enjeux relatifs à la construction d'horaires de travail par exemple viennent s'imbriquer à la couverture des tâches. Pour ces derniers cependant, malgré des exceptions, les problématiques les plus couramment adressées dans littérature se placent, à l'inverse des problématiques d'ordonnancement les plus classiques, dans un cas de figure où le placement et la durée des tâches sont connues ou estimées, et généralement préemptives. Le problème de planification consiste alors à trouver une solution couvrant les besoins, ainsi une fois encore les aspects sont décorrélés, même si l'ordre est inversé.

Parmi les spécificités qui n'existent pas sur les ressources matérielles, l'élément central sur lequel s'arrêter concernant les ressources humaines est celui lié à la législation du travail. Ce premier ensemble de contraintes est tout à fait dépendant du pays, du secteur d'activité et des conventions d'entreprise. Ces éléments semblent de prime abord assez simples à définir. La pratique montre pourtant de vastes problématiques dans lesquelles des contraintes légales sont contournées, ou négligées ou bien uniquement pénalisées car sur un plan opérationnel, il ne s'agit pas de contraintes dites "dures". Par exemple, la plupart des problèmes de gestion de projet, bien que basés sur des affectations de ressources humaines font fi des contraintes horaires. Cela s'explique par la granularité de la prise de décision. La durée d'une tâche assignée à un employé peut par exemple être de l'ordre de plusieurs semaines. Si la personne ainsi affectée n'a que cette unique tâche dans son planning sur un si long horizon, il n'est en général pas utile de modéliser finement ses horaires de travail et le positionnement des pauses par exemple. Ainsi, les contraintes d'amplitude, de repos et autre n'auront pas à être intégrées ni vérifiées. En même temps que la simplification du problème, d'un point de vue managérial, il est souvent positif de ne pas arbitrer ces décisions sur les horaires et laisser ainsi la liberté de son organisation à l'employé.

Par opposition, lorsque le problème requiert une granularité de modélisation très fine, chaque changement d'activité doit être modélisé et arbitré. Ainsi, les plannings des em-

ployés des centre d'appel par exemple sont fixés au quart d'heure en général, et l'employé ne peut prendre une pause en dehors de celle qui lui a été pré-affectée. Dans ce cas, les modèles intègrent les contraintes légales. Cependant, les décideurs y ajoutent souvent d'autres contraintes permettant d'éviter des créations de plannings jugés trop pénibles, même si le cadre légal le permet. L'appréciation de cette pénibilité ou des pratiques acceptables est souvent à la discrétion des décideurs, en concertation avec les employés concernés lors de négociation, ou simplement basée sur un historique. Il est donc communément admis d'ajouter des règles de gestion supplémentaires afin de tenir compte de ces éléments. On citera par exemple certains aspects traités dans les problèmes de planification de personnel hospitalier pour lesquels certains enchaînements d'horaires de travail sont interdits pour éviter une pénibilité excessive alors même que la législation les autorise. Ainsi, aux contraintes légales, viennent s'ajouter les contraintes d'un autre ensemble, issues de considérations opérationnelles, managériales ou autre, qui peuvent être souples ou non, et qui sont parfois difficiles à arbitrer entre elles lorsque c'est nécessaire.

Avec l'évolution du contexte socio-économique, la littérature s'est donc élargie et fait maintenant état d'un important panel de contraintes ou objectifs mis en exergue avec différentes préoccupations, sur les différents horizons de décision. Une part de nos travaux est ainsi orientée vers la prise en compte des contraintes humaines et des particularités des ressources humaines.

## 2.4 Motivation et cohérence du projet

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'étude des problèmes d'ordonnement a pour objet l'utilisation du temps et sa mise à profit pour la réalisation d'un ensemble de tâches ou travaux. Cela peut prendre bien des aspects selon les besoins, les contraintes et la notion de profit, ou d'utilité, telle qu'elle est perçue par le(s) décideur(s) qui énonce(nt) le problème. Parallèlement, nous avons établi comment la gestion des ressources humaines s'articule autour d'une répartition aussi efficace que possible pour couvrir, dans le cadre de contraintes spécifiques, des besoins généralement estimés. Là encore, les objectifs pris en compte peuvent porter sur de nombreux aspects selon les cas.

En effet, si à l'origine les préoccupations essentielles étaient la maîtrise des coûts salariaux, la littérature s'est significativement étendue afin d'intégrer des aspects humains bien plus larges. Au-delà de la fonction d'utilité au service des tâches à réaliser, avec une prise en compte des ressources humaines à différents degrés et à travers différentes contraintes, ou attentes de la part des décideurs, on voit apparaître de nombreuses approches afin de prendre en compte des fonctions d'utilité propres à ces ressources humaines. Il sera par exemple question de modéliser les aspirations propres, les intentions, les ressentis, etc... La prise en compte des travailleurs met donc également en évidence des contraintes, et souvent des objectifs, propres aux ressources humaines ou à certaines d'entre elles, que le décideur prendra en compte pour des considérations larges de management de ses équipes et au service de la fonction d'utilité qu'il considère. Une meilleure prise en compte de ces aspects est un levier essentiel de la qualité de l'ordonnement et

de la satisfaction au travail. Mieux intégrer ces aspects, ou toute contrainte nouvelle, et contribuer à l'élaboration d'approches affinées au service des participants est un but essentiel de nos approches. L'intégration, pour une résolution conjointe, des aspects ressources matérielles et ressources humaines est sans conteste un véritable levier d'optimisation pour lequel de nombreux projets peuvent encore être menés.

Cependant, lorsque l'on souhaite intégrer beaucoup de contraintes atypiques, ainsi que les aspects humains aux problématiques de gestion de production, le problème devient bien souvent difficile à appréhender dans sa globalité, comme nous l'avons établi précédemment. Pourtant, les avancées récentes en informatique, couplées aux progrès techniques et technologiques des supports ont permis des progrès significatifs dans le champ de l'aide à la décision. On peut donc nourrir l'espoir de lever ainsi de nouveaux verrous pertinents dans le contexte socio-économique actuel. Réciproquement, les cas d'étude viennent nourrir la recherche fondamentale par l'émergence de nouvelles questions à investiguer. Les outils issus de travaux de valorisation de la recherche constituent un véritable levier d'amélioration dans ce domaine et ce transfert de technologie a une part importante dans la diffusion de la connaissance et la validation des modèles issus de la recherche fondamentale.

Ainsi, les problématiques abordées, issues de partenariats industriels pour la plupart, ont permis de mettre en évidence des axes de recherche variés, avec une prise en compte des ressources humaines ou non et à travers différentes contraintes, ou attentes de la part des décideurs.

## 2.5 Partenariats et contextes applicatifs

Comme mentionné précédemment, les différents partenariats industriels permettent d'aborder de nouveaux champs d'investigation théoriques ou au contraire fournissent un périmètre de mise en application pour valider des approches et méthodes.

En préalable à toute résolution, le travail de compréhension et de modélisation reste un élément décisif de la démarche de résolution. Au-delà d'être le seul moyen de caractériser les besoins auquel répondre du point de vue du décideur, c'est également le premier levier pour identifier les verrous scientifiques en jeu. Lors de tout processus de décision, certains éléments essentiels doivent être pris en compte par les décideurs car ils correspondent à la réalité d'un domaine d'activité, d'une ressource, d'un process, ou d'un besoin. Cependant, d'autres aspects sont parfois pris en compte par un décideur uniquement par habitude, par besoin de simplification ou parce que l'ouverture à d'autres pratiques n'a pas été envisagée. Faire la différence entre les aspects essentiels et les ajouts pour dégager les réelles contraintes ou objectifs des souhaits ou des habitudes peut ainsi s'avérer difficile. Savoir quel degré d'agrégation ou de décomposition adopter face à certains éléments d'un problème doit également être un aspect investigué, car il peut avoir un impact très fort sur la modélisation du problème. Ces éléments de caractérisation sont la clé de voûte du processus de résolution. Les démarches retenues sont aussi nombreuses et uniques que les

problèmes réels rencontrés.

A cette difficulté de savoir quelles sont les règles de gestion pertinentes à conserver, il est souvent nécessaire de prendre en compte des évolutions du contexte qui viennent bousculer l'expertise des décideurs. Les besoins des entreprises croissent également, et les outils d'aide à la décision deviennent ainsi d'autant plus nécessaires. En effet, la gestion des ressources est un défi critique en entreprise, mais également sur un plan sociétal. La prise de conscience des impacts environnementaux, de la limite des ressources naturelles, et le besoin de rentabiliser chaque investissement poussent toujours davantage à cette optimisation de l'utilisation des ressources.

La volonté d'intégrer de plus en plus d'éléments de décision en une même problématique permettant une résolution plus large rejoint les préoccupations de prises en compte de tout ces aspects, mais aussi des acteurs au quotidien. Ce champ d'investigation de la recherche en lien avec la gestion de production et la gestion des ressources humaines accompagne donc une évolution des entreprises. La partie suivante est dédiée à présenter quelques entreprises avec lesquelles nous avons pu travailler.

### 2.5.1 Groupement Métalia

Dans le cadre du projet partenarial Prodflex (2010-2011), nous nous sommes intéressés à un problème d'ordonnancement dans des ateliers de production. Ce projet triparties, porté par un éditeur de logiciel, impliquait notamment Métalia, un groupement d'industries métallurgiques de petite taille, produisant de la petite et moyenne série de composants métalliques. Ces entreprises rencontraient des difficultés à construire l'ordonnancement de la production dans les différents ateliers et constataient des retards de livraisons fréquents. Le projet avait donc pour objet la création d'un logiciel d'ordonnement dédié, basé sur un moteur d'optimisation que nous avons proposé.

Le problème identifié avec ces partenaires est un problème de production avec des gammes de type jobshop flexible (Prot and Bellenguez-Morineau (2012)). Les ressources nécessaires à la production sont les machines multi-usages des ateliers et les réglers, ou opérateurs, en charge de la production. Les machines utilisées étant très hétérogènes, les opérations de la gamme principale de production font toujours appel à la machine (ou l'ensemble de machines) la plus adaptée et rapide pour la tâche concernée. Celles-ci pouvant être tout à fait saturées, il existe également pour de nombreuses tâches des gammes alternatives de production sur d'autres ressources machines moins adaptées. Ceci nous amène à identifier des tâches multi-modes (Brücker and Neyer (1998)). De plus, les machines multi-usages doivent être réglées manuellement chaque fois que l'on change de famille de pièces produites, et ces temps de réglage peuvent être très conséquents au regard des durées de production. Pour cette raison, il est essentiel que la modélisation prenne en compte les temps de réglage entre famille.

La problématique de gestion des ressources humaines était déconnectée de l'ordonnement de production et managée en amont. Les opérateurs, ou réglers, sont donc

considérés disponibles sur des plages de 8 heures, par équipes, suffisamment importantes et dont les compétences sur les machines s'équilibrent suffisamment pour que le chef d'atelier leur délègue l'affectation des temps de réglage en autonomie, ainsi que la gestion de leurs pauses. Le planning de chaque employé n'est donc pas à proprement parlé construit en détail. Les horaires de chaque personne sont fixés en amont par répétition d'un motif de rotation, puis au sein de chaque équipe la répartition du travail se fait de façon collégiale. Le travail au sein de ce projet a fait l'objet du post-doctorat de Damien Prot, du stage de Martin Géhan, en collaboration avec Christelle Guéret et David Lemoine.

### 2.5.2 West Speed-dating

Cette petite société est organisatrice d'évènements. Son responsable a choisi de s'orienter vers le créneau porteur du speed-dating et crée donc régulièrement des soirées de rencontres dans différents lieux partenaires. Les rencontres rapides qui ont lieu suivent un planning fixé par l'organisateur et ne doivent pas dépasser la durée prévue. Par la suite, des évènements de speed-dating professionnel seront prévus afin de mettre en relation futurs employeurs et employés.

Le décideur cherche donc à produire des plannings pour les successions de rencontres d'une session qui satisfassent les participants. Les tâches à ordonnancer sont toutes identiques et requiert des ressources non interchangeable qui sont les personnes en jeu dans cette rencontre. Il n'y a donc pas de problème d'affectation sous-jacent. Si tous les participants souhaitent se rencontrer et sont à l'heure, le planning est trivialement construit, par rotation. Cependant dans la pratique, les déséquilibres de population, les retards constatés en particulier, ainsi que les rendez-vous à éviter entre personnes qui se connaissent rendent le problème plus complexe.

Une première collaboration avait eu lieu à travers le stage de fin d'étude de Tanguy Lapègue et avait donné lieu à différentes règles de gestion sur le déroulement des soirées, ainsi qu'un premier modèle en programmation par contraintes pour construire itérativement un planning en fonction des arrivées réelles des participants prévus. Par la suite, la thèse d'Agnès Le Roux est venue approfondir la caractérisation et la résolution de ce problème complet.

### 2.5.3 Biotrial

Dans le cadre du projet MAESTRO, nous avons travaillé avec la société Biotrial, qui effectue des campagnes de tests de produits actifs sur volontaires sains pour le compte de l'industrie pharmaceutique. Ces tests font partie du protocole obligatoire pour obtenir les autorisations de mise sur le marché d'un principe actif. Chaque campagne de test nécessite que les volontaires soient soumis à une batterie de tests très précis et selon un déroulement scrupuleusement prédéfini, ce qui engendre des tâches fixées dans le temps très nombreuses, à répartir sur une équipe d'infirmiers et de techniciens de laboratoire,

dont il faut construire les plannings en tenant compte de la législation, des disponibilités et des compétences. Lorsqu'il n'est pas possible de couvrir la charge de travail par l'affectation des employées, des recrutements de personnel intérimaire ont lieu. L'objectif de ce projet était de construire pour eux un logiciel de création des plannings de travail, basé sur un moteur d'optimisation permettant de limiter les surcouts en personnel, mais surtout l'investissement important nécessaire de la part des décideurs pour arbitrer ce problème d'envergure. En effet, lorsque nous avons initié cette collaboration, la construction du planning personnel occupait presque totalement deux infirmières à temps plein.

Le problème identifié est à la croisée de l'ordonnancement de tâches à dates fixées et de la planification de personnel, avec toutes les problématiques de contraintes légales et organisationnelles sous-jacentes. Beaucoup de contraintes légales et métier rejoignent celles des infirmières dans le domaine hospitalier, mais l'ordonnancement très fin des tâches vient ici fortement modifier la modélisation qu'il est nécessaire de proposer. Ce problème a été très largement investigué à travers la thèse de Tanguy Lapègue.

## 2.6 Plan du manuscrit

Inspiré de ces rencontres industrielles et de mon intérêt pour l'ordonnancement et la planification de personnel, ce manuscrit s'articule autour de problèmes qui existent dans ces deux champs d'investigation. Nous présentons quelques contributions sur les aspects théoriques et la complexité à laquelle je touche avec un réel plaisir du défi que cela représente, malgré la frustration certaine de toutes les voies sans issues, ou non abouties, abordées. Nous présentons également des contributions basées sur des problématiques réelles, et le verrou de la modélisation à retenir. Les projets démarrent souvent avec l'espoir naïf qu'il soit possible in fine de déléguer tout à fait le processus de décision lorsque l'ampleur des données les rendent inappréhendables "à la main", sans perdre l'efficacité de l'expertise. Et si cet objectif n'est jamais atteint, la conviction de contribuer à une meilleure approche reste présente.

Nous abordons ainsi différentes problématiques à travers les différents chapitres de ce document. Une première partie est dédiée à des problèmes assez classiques en ordonnancement, le premier chapitre adressant des problèmes d'atelier, dont une part des travaux est en lien avec le problème abordé au cours de la collaboration avec Métalia, et une part porte sur des généralisations plus théoriques. Ce premier chapitre établit donc particulièrement la contribution sur des critères classiques en ordonnancement, notamment le retard algébrique et la somme des retards, en particulier sur des problèmes à machines parallèles. Ces travaux sont notamment basés sur une collaboration avec Damien Prot.

Le second chapitre aborde le cadre de la gestion de projet, et notamment les contributions autour du problème de gestion de projet multi-compétence. Le point fort de ce modèle repose sur la prise en compte des compétences multiples dont sont capables en particulier les ressources humaines. Dans la lignée des travaux de thèse précédents, les

approches proposées ici reposent essentiellement sur la thèse de Carlos Montoya, soutenue en 2012, en collaboration avec David Rivreau et Eric Pinson. Ce chapitre, comme tous ceux à suivre, s'attache à ne considérer que des ressources humaines pour la réalisation d'un ensemble de tâches.

Par la suite, la seconde partie s'arrête davantage sur des problèmes directement issus d'approches dédiées à la planification de personnel. Nous nous arrêtons d'abord sur des problèmes d'ordonnancement de rendez-vous, incluant un problème récemment apparu : le speed-dating. Ce problème, au coeur de la thèse d'Agnès Le Roux, est issu des premiers travaux avec West Speed-dating. Le point particulier de ce problème est son objectif spécifique et sa structure même qui en fait un champ d'investigation original.

Enfin, le chapitre 6 introduit le cadre de la législation du travail comme contrainte forte des problèmes de planification de personnel. Une large part des travaux est orientée sur un problème issu du projet MAESTRO, mené avec Biotrial, qui s'est avéré un champ d'investigation très large. Ce problème, qui, au premier abord, semble proche du Nurse Rostering Problem, se trouve finalement au confluent de problèmes de planification d'employés, et de problèmes d'ordonnancement de tâches à dates fixées. Ce partenariat a fait l'objet de nombreuses investigations quand à la modélisation des ressources humaines, de leurs contraintes et attentes. Les contributions sont notamment issues de la thèse de Tanguy Lapègue.

Ordonnancer pour bien utiliser le temps pour le mettre à profit à court terme, tout en prenant les aspects humains en compte est un défi d'envergure. Il s'agit tout à la fois d'organiser pour atteindre une réalisation mais aussi respecter les contraintes personnelles et les limites de chacun. Tous ces défis ont été partiellement abordés par de nombreux auteurs. Ce manuscrit a pour objet de montrer comment nous avons tenté de contribuer à ce champ d'investigation, sur différents aspects.

Première partie

Problèmes d'ordonnancement

Cette première partie s'attache à certains problèmes d'ordonnancement classiques sur lesquels nous avons travaillé. En particulier des problèmes d'atelier mettant en jeu des ressources parallèles dans un premier temps, puis des problèmes de gestion de projet dans un second chapitre.

Les ressources humaines ne sont ici pas spécifiquement traitées, et donc vues comme non différenciées des ressources matérielles, ou non prises en compte dans la modélisation. Ce type d'approche correspond à de nombreuses problématiques investiguées dans la littérature en ordonnancement.

## Chapitre 3

# Problèmes d'atelier

---

Ce chapitre porte sur différents problèmes d'ordonnancement d'atelier auxquels nous sommes intéressés. La littérature est très abondante sur ces problèmes qui ont été étudiés depuis plus d'un demi-siècle, avec un accroissement graduel des contraintes prises en compte. Nous nous intéressons ici dans un premier temps à des problèmes d'atelier mettant en jeu des ressources parallèles. Par la suite, nous investiguons quelques problèmes de production avec gammes complexes, qui s'insèrent dans la famille des problèmes de jobshop.

## 3.1 Introduction

Parmi les problèmes d'atelier que l'on peut rencontrer dans la littérature, nous nous arrêtons dans un premier temps sur la famille des problèmes à machines parallèles. Cette famille de problèmes tient son origine à la problématique réelle que l'on trouve dans de nombreux contextes, où la saturation d'une ressource ou d'un ensemble de ressources amène à dupliquer celles-ci, permettant de répartir la charge. C'est tout d'abord vrai dans le contexte de la production, avec, par exemple, la duplication d'une machine goulet. Plus récemment, on peut également citer le cadre de la parallélisation du calcul, qui amène à considérer un ensemble de ressources plus ou moins équivalentes contribuant en parallèle à la réalisation d'un ensemble de tâches. Les applications en lien avec ce type de problématiques sont nombreuses.

Sur un plan théorique, cette grande classe de problèmes permet un premier champ d'élargissement des investigations et des résultats qui existent pour les problèmes à une machine. Cela permet notamment de mettre en évidence les cas où des extensions et généralisations sont possibles, mais aussi les limites. D'autre part, les résultats établis dans un environnement composé de machines parallèles serviront de base à certains problèmes plus complexes. En effet, l'ordonnancement sur ressources parallèles correspond à la problématique de l'ordonnancement d'un étage dans un environnement de type jobshop flexible notamment. Ainsi, les résultats sur la structure de ces premiers problèmes seront réinvestis dans les seconds.

Des résultats théoriques de complexité sont proposés sur certains problèmes à machines parallèles, c'est pourquoi nous commençons par rappeler quelques éléments de base de cette théorie.

## 3.2 Complexité des problèmes à machines parallèles

Parmi les travaux en ordonnancement théorique, il existe de nombreuses contributions montrant l'intérêt fort pour la caractérisation de la frontière de complexité entre les problèmes. En effet, la théorie de la complexité établit l'existence de plusieurs classes. Caractériser un problème combinatoire, c'est donc d'abord établir sa classe de complexité,

autrement dit son niveau potentiel de difficulté de résolution. Cette information va permettre de déterminer les méthodes de résolution qui peuvent être considérées pour une approche efficace.

Au sein des problèmes d'optimisation combinatoire, on distingue tout d'abord les problèmes de décision des problèmes d'optimisation. Un problème de décision est un problème qui admet une réponse de type "oui" ou "non". Un problème d'optimisation en revanche répond à une question du type "quelle est la valeur d'une solution optimale pour ce critère?". Cependant, étant donné un problème d'optimisation, on peut définir un problème de décision de type "existe-t-il une solution de valeur inférieure/supérieure à  $X$ ?" dont la complexité est équivalente. On peut donc déterminer la complexité d'un problème d'optimisation par l'étude du problème de décision ainsi obtenu.

Etudier la complexité d'un problème signifie établir la complexité d'un algorithme en mesure de résoudre optimalement ce problème. Cette complexité algorithmique influe directement sur le temps qu'il faudra à cet algorithme pour aboutir à une réponse, par rapport à la taille de l'instance à résoudre. Si cette instance est de taille  $n$ , alors l'algorithme qui effectue un nombre d'opérations unitaires proportionnel à  $n$  est de complexité proportionnel à  $n$ . Si cette proportion peut être bornée par une fonction qui s'écrit sous forme de polynôme fonction de  $n$ , alors l'algorithme est polynomial. En revanche, si on ne peut la borner que par une fonction exponentielle de  $n$ , alors l'algorithme sera qualifié d'exponentiel. C'est cette fonction qui permet d'évaluer l'efficacité, et donc la complexité, d'un algorithme de résolution. Cela permet notamment de distinguer les deux classes principales de complexité suivantes pour les problèmes de décision :

- Les problèmes de la classe  $\mathcal{P}$  sont les problèmes qui peuvent être résolus par un algorithme polynomial.
- Les problèmes de la classe  $\mathcal{NP}$  sont les problèmes qui peuvent être résolus en temps polynomial par une machine de Turing non déterministe. Une solution peut ainsi être vérifiée par un algorithme polynomial, mais il n'existe pas d'algorithme de résolution polynomial, sauf si  $\mathcal{P} = \mathcal{NP}$ . Parmi ces problèmes on distingue encore deux cas. On dira qu'un problème de décision est  $\mathcal{NP}$ -Complet au sens fort si un algorithme de résolution reste exponentiel sur un encodage unaire de l'instance. S'il n'est exponentiel que sur un encodage binaire, le problème est alors  $\mathcal{NP}$ -Complet au sens ordinaire, ou sens faible.

Pour un problème d'optimisation, si l'on peut montrer que sa version décisionnelle est un problème  $\mathcal{NP}$ -Complet, alors ce problème d'optimisation est  $\mathcal{NP}$ -Difficile. Or, établir la  $\mathcal{NP}$ -complétude d'un problème de décision ( $P_2$ ) se fait sur la base d'une réduction polynomiale, au sens de la définition précédente. Il est donc nécessaire d'identifier un problème ( $P_1$ )  $\mathcal{NP}$ -Complet qui peut se réduire à celui-ci. On montre ainsi que ( $P_2$ ) est au moins aussi difficile que ( $P_1$ ) à résoudre. Autrement dit, si ( $P_2$ ) peut avoir une réponse en temps polynomial, il en va de même pour le problème considéré, ce qui est en contradiction avec la  $\mathcal{NP}$ -complétude de ( $P_1$ ). On peut donc en déduire que ( $P_2$ ) n'admet pas d'algorithme de résolution polynomial, à moins que  $\mathcal{P} = \mathcal{NP}$ . La réduction

polynomial étant transitive, on peut ainsi établir la complexité de nombreux problèmes par ce mécanisme. Si l'on considère un graphe de réduction entre problèmes, il est donc pertinent d'établir le cas le plus général pour lequel les problèmes sont encore polynomiaux, ainsi que le plus petit cas à partir duquel une problématique devient  $\mathcal{NP}$ -Difficile.

**Définition 1** *Un problème  $(P_1)$  se réduit polynomialement à un problème  $(P_2)$  s'il existe un algorithme polynomial qui transforme toute instance de  $(P_1)$  en instance de  $(P_2)$  telle que la réponse à l'instance de  $(P_1)$  est oui si et seulement si la réponse à l'instance de  $(P_2)$  est oui.*

Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés à la complexité de certains problèmes à machines parallèles. La littérature fait état de nombreux résultats. Par exemple, malgré son énoncé très simple, le premier problème à machines parallèles généralement abordés dans nos enseignements est déjà un problème  $\mathcal{NP}$ -Difficile (Garey and Johnson (1978)), alors qu'il s'agit d'un problème trivial sur ressource unique (puisque toute solution calée à gauche est optimale). En effet, le  $P_m || C_{max}$  est tout simplement le problème de la répartition d'un ensemble de travaux sur un ensemble de machines identiques, afin de finir au plus tôt. Comme mentionné précédemment, sa complexité peut être aisément établie en considérant le plus petit cas, i.e., si l'on considère uniquement deux machines en parallèle. Or, le problème de décision associé au  $P_2 || C_{max}$ , i.e. le problème  $P_2 || C_{max} \leq k$ , peut être vu comme une instanciation du problème partition, qui est un problème  $\mathcal{NP}$ -Complexe (Karp (1972)).

Comme pour toute famille de problèmes, celles des machines parallèles peut se décliner selon de très nombreuses contraintes et fonctions objectif. On distinguera cependant la classe particulière des problèmes considérant des critères réguliers.

**Définition 2** *Un critère est dit régulier s'il peut s'exprimer sous forme d'une fonction non décroissante des dates d'achèvement des travaux.*

Ainsi les fonctions objectif visant à minimiser la date d'achèvement global ( $C_{max}$ ), le retard maximum ( $L_{max}$  ou  $T_{max}$ ), ou encore la somme des dates d'achèvement ( $\sum C_j$ ) sont des critères réguliers. Nous désignerons par la suite  $f$ , toute fonction objectif régulière. Il existe notamment différentes propriétés de dominance sur ce type de problème. On sait par exemple que, pour une fonction  $f$ , les ordonnancements actifs, i.e., pour lesquels il n'est pas possible d'insérer un travail plus tôt dans la solution sans retarder un autre travail, sont dominants Pinedo (2002). Cependant, et en dépit des très nombreux travaux sur ces sujets, il reste des problèmes ouverts, c'est-à-dire dont la complexité n'a pas été établie.

### 3.2.1 Cas des problèmes avec préemption

Parmi les problèmes à machines parallèles, on considère dans cette partie, le cas des problèmes autorisant la préemption, notée  $pmtn$ , qui signifie que l'exécution d'un travail

peut être interrompue avant la fin et reprendre soit sur une autre ressource, soit sur la même, plus tard. Ces problèmes ont été largement étudiés dans les dernières décennies. Cependant, de nombreux cas restent encore ouverts.

Dans Prot et al. (2013), nous avons notamment étendu les travaux de Baptiste et al. (2007) et montré que pour des problèmes de la forme  $P|pmtn|f$ , il existe une structure dominante des solutions que l'on appelle Permutation Flowshop-like. Cette structure peut se caractériser de la façon suivante :

**Définition 3** *Un ordonnancement est dit Permutation Flowshop-like (noté PFS-like), i.e., admet une structure similaire à une solution admissible pour un problème de flowshop de permutation, s'il remplit les conditions suivantes :*

- les travaux sont ordonnés verticalement, i.e., à tout instant l'ensemble des travaux en cours d'exécution suit un ordre croissant selon les machines.
- aucune machine n'effectue plus d'un morceau d'un même travail. il n'y a donc pas de recirculation vers une machine qui a déjà partiellement effectué le travail  $i$ .
- la séquence des travaux est la même sur toutes les machines.

Cette dernière propriété est notamment celle qui donne sa structure similaire au flowshop de permutation à ce type d'ordonnancement. Etant donné qu'elle s'applique sur des problèmes autorisant la préemption, cette structure ne permet pas de déterminer la durée de chaque morceau d'un travail effectué par chacune des machines. Cependant, si l'on fixe un ordre pour les dates de fin des travaux, autrement dit pour une séquence de travaux définie, il est alors possible de déterminer une solution optimale respectant cette séquence, à l'aide d'un programme linéaire, permettant de déterminer les durées de chaque parties de travail effectué sur les différentes machines. Ainsi, une solution optimale peut être construite en temps polynomial pour tout problème de la forme  $P|pmtn|f$ , si l'on est en mesure de fixer la séquence dans laquelle traiter les travaux.

Or, pour un problème de cette forme, admettant des dates de début au plus tôt, on montre que la séquence ordonnée selon ces dates de début est dominante. Ainsi, il est possible de résoudre le  $P|pmtn, r_j|f$ , en renumérotant les travaux selon l'ordre croissant de leur  $r_j$  et en construisant l'ordonnancement PFS-like correspondant à cette séquence. Les durées des morceaux de tâches effectués par chaque machine peuvent alors simplement être déterminés par un programme linéaire. Ce résultat peut être vu comme une généralisation des travaux de Lawler and Labetoulle (1978) portant sur le  $P|pmtn, r_j|L_{max}$ .

Par extension de cette approche, il est également possible de résoudre en temps polynomial d'autres problèmes de structure proche. Pour cela nous rappelons la notion "agreeability", i.e. concordance, introduite par Tian et al. (2009). Cela concerne certaines contraintes que l'on peut trouver pour un problème donné, lorsque celles-ci, ordonnées selon un tri croissant, amène à la même séquence de travaux. par exemple  $p_j$  et  $d_j$  sont dits "agreeable", ou concordants, si les travaux classés par Earliest Due Date (EDD) donnent la même séquence que les travaux classés par Shortest Processing Time (SPT). On note alors dans le champ  $\beta$  de la notation à trois champs :  $(p_j^+, d_j^+)$ . Etant donné

cette notation, les problèmes suivants peuvent être adressés en temps polynomial par une approche similaire.

- $P|pmtn, (r_j^+, p_j^+) | \sum f_j$ , les  $f_j$  étant des fonctions régulières et  $f_j - f_k$  non décroissante si  $j < k$
- $P|pmtn, (r_j^+, p_j^+) | \max f_j$ , les  $f_j$  étant des fonctions régulières et  $f_j - f_k$  non décroissante si  $j < k$
- $P|pmtn, (r_j^+, p_j^+, w_j^-), d - j = d | \sum w_j U_j$

### 3.2.2 Résultats de complexité

Sur la base de ces propriétés, et des réductions existant entre différents problèmes à machines parallèles, nous pouvons affiner les classes de complexité parmi ces problèmes et proposer un schéma général. Les résultats nouveaux sont en gris sur la figure 3.1.

## 3.3 Problèmes à gammes complexes

Lorsque l'on adresse un problème  $\mathcal{NP}$ -Difficile, nous l'avons vu, il n'existe pas a priori d'algorithme polynomial permettant de le résoudre, sauf si  $\mathcal{P} = \mathcal{NP}$ . Du point de vue d'un décideur, il est cependant nécessaire d'obtenir une solution en un temps qui soit raisonnable. Pour cette raison, il est souvent pertinent de mettre en place une méthode de résolution approchée, ou une décomposition du problème. Le choix de la méthode de résolution passe notamment par la prise en compte des spécificités du problème considéré.

### 3.3.1 Contraintes spécifiques

De nombreux travaux existent autour des problèmes d'atelier mettant en jeu des contraintes additionnelles particulières. Les problèmes de jobshop font l'objet de nombreuses contributions en ce sens. On peut tout d'abord définir ce problème dans sa version classique : il existe des travaux nécessitant plusieurs opérations pour être réalisés, chacune des opérations ayant ses propres besoins en ressources et sa durée. Chaque travail suit sa propre gamme de fabrication, ce qui signifie que les travaux ont des parcours propres au sein de l'environnement des ressources, par opposition au flowshop, pour lequel tous les travaux suivent la même gamme.

Dans Dauzère-Pérès and Paulli (1997), les auteurs considèrent un jobshop flexible, i.e., que chacun des travaux admet sa propre gamme de production, mais que, à certains étages de la production, il existe des ressources parallèles, et donc une flexibilité sur la ressource à affecter. Cependant, cette modélisation permet de capturer uniquement les opérations d'un travail qui nécessitent une unique ressource. Dauzère-Pérès et al. (1998) et Brücker and Neyer (1998) proposent en revanche un modèle appelé multi-mode jobshop, pour lequel, à chaque étape de la gamme de production, i.e., pour chaque opération, il existe plusieurs modes d'exécution. un mode d'exécution se définit par un ensemble de

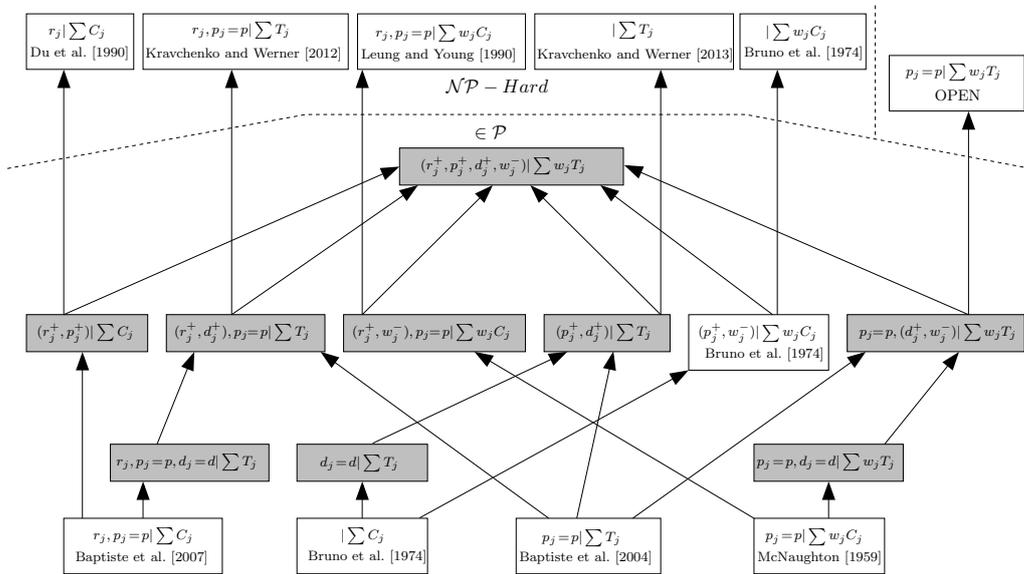


FIGURE 3.1 – Graphe de réduction entre problèmes de type  $P|pmtn, r_j | \sum w_j T_j$ . la mention “ $P|pmtn,$ ” est omise. Chaque arc se lit “est un sous-problème de”. Les encadrés gris mettent en évidence les nouveaux résultats.

ressources nécessaires et une durée d'exécution.

Une autre particularité qui peut se présenter dans des problèmes tient aux temps de réglage des machines, appelés *set up*. Sur un problème réel, cela peut correspondre aussi bien au temps de montage d'un outillage particulier sur la machine, qu'à son calibrage pour une production donnée ou encore un temps de chauffe par exemple. Il existe plusieurs familles de problèmes selon la nature du *set up*. En effet, celui-ci peut être constant pour un travail, i.e., indépendant de l'état préalable de la machine, et le temps nécessaire peut ainsi être simplement considéré comme un allongement du temps d'exécution de chaque tâche. Il peut en revanche être dépendant de la séquence, i.e., à la fois de la tâche précédente et de la tâche à réaliser. Il est alors nécessaire de tenir compte des enchaînements de travaux car cela va venir augmenter ou diminuer ce temps bloqué pendant lequel la ressource ne produit pas. Dans ce cas, cette problématique vient interférer sur la construction de la séquence optimale au sens du critère pris en compte.

Sans faire une étude exhaustive, nous nous arrêtons en particulier sur la notion de *sequence-dependant batch setup times*  $ST_{sd,b}$ , tels que décrits dans Potts and Kovalyov (2000) et Allahverdi et al. (1999). Il s'agit ici de cataloguer les travaux par famille. Chaque opération appartient à une famille à l'intérieur de laquelle enchaîner les opérations n'engendre que très peu, voire pas, de temps de réglages. En revanche passer d'une famille à une autre donne lieu à des temps de réglages conséquents.

Dans le cadre du projet Prodfow, en partenariat avec le groupe Métalia, évoqué en introduction, nous nous sommes intéressés à un problèmes de Jobshop qui peut se décrire à l'aide de la notation complète suivante :  $MMJS|r_j, d_j,intree, ST_{sd,b}|L_{max}$ , selon la notation à trois champs classique en ordonnancement. Il s'agit donc d'un problème de jobshop multi-mode, pour lequel les travaux admettent des fenêtres d'exécution, définies par leur date de début au plus tôt  $r_j$  et leur date de fin souhaitée  $d_j$ . Les gammes de production connaissent une étape finale d'assemblage, qui est mise en évidence par la notion de *intree* dans les contraintes de précédences à considérer. Enfin, les *set up* sont dépendants de la séquence et de la famille du travail.

### 3.3.2 Evaluation par défaut

Lorsque l'on propose une résolution approchée d'un problème d'optimisation combinatoire, il est toujours pertinent d'évaluer la qualité de la solution fournie par l'algorithme considéré. La façon la plus évidente d'établir cette évaluation est de poser une comparaison avec la valeur d'une solution optimale. Cependant, pour les problèmes  $\mathcal{NP}$ -Difficile, dont la résolution nécessite un temps d'exécution dépendant de la taille de façon exponentielle, il est fréquent d'atteindre la limite au-delà de laquelle il n'est pas possible d'attendre la réponse.

On cherche dans ce cas à estimer au mieux l'écart à l'optimum. Si l'on considère un problème de minimisation, établir une évaluation par défaut de l'objectif, permet de

connaître l'écart maximum entre une solution réalisable et cet optimum, qui, dans le pire cas, est égal à son évaluation par défaut, aussi appelée borne inférieure. De plus, les approches permettant d'établir une évaluation par défaut peuvent être appelées au sein de méthodes exactes pour réduire la recherche. Les techniques d'évaluation par défaut reposent généralement sur la résolution d'une version relaxée du problème.

Les premières bornes inférieures triviales qui peuvent être envisagées sur un problème complexe reposent sur la relaxation d'une des caractéristiques fortes du problème. On peut en premier lieu relâcher le nombre fini de ressources. Le chemin critique déterminé sur le graphe des contraintes de précédence devient alors une évaluation par défaut de la durée minimum d'un ensemble de tâches. À l'inverse, on peut relâcher les contraintes de précédence et évaluer la quantité de travail minimum par ressource afin d'avoir une autre évaluation par défaut de la durée totale.

Dans le  $MMJS|r_j, d_j,intree, STsd, b|L_{max}$ , et tenant compte de la concordance des dates de début au plus tôt et des dates dues, il est possible d'obtenir une borne inférieure à l'aide de la résolution des sous-problèmes sur machines parallèles impliquées. Le programme linéaire introduit précédemment permet ainsi d'établir une borne inférieure en relâchant la contrainte de non-préemption des travaux et en négligeant les set up.

### 3.3.3 Résolution approchée

Les problèmes d'atelier complexes ont été intensivement abordés dans la littérature. On trouve de nombreuses approches à base de résolution approchée, permettant ainsi de construire une solution en un temps limité. Les premières méthodes de recuit simulé, les algorithmes génétiques, colonies de fourmis ou autres méthodes de résolution basées sur une recherche itérative permettent une résolution ad hoc. Toutes ces méthodes appartiennent à la catégorie des méta-heuristiques. Il s'agit de techniques générales, qui doivent être déclinées selon le problème adressé. Ces méthodes permettent d'adresser des problèmes très variés et il en existe de très nombreuses instanciations. On peut distinguer deux grandes familles : les approches à base de population (algorithmes génétiques en particulier, mais aussi méthodes à base de colonies de fourmis ou d'essaims, etc... ) et les approches par voisinages (recuit simulé, recherche tabou, recherche à voisinage large, ...). On retrouve cependant toujours les éléments suivants :

- Il est tout d'abord nécessaire de définir comment représenter une solution. Autrement dit, comment décrire un individu ou un élément de l'espace des solutions autour duquel la recherche va être menée. Après ce choix, il est nécessaire de mettre en place une phase d'initialisation de l'algorithme. Celle-ci a pour but de fixer le point de départ de la recherche qui va être menée dans l'espace des solutions. Ainsi, on construit une première solution (pour les méthodes à base de voisinage) ou une population de solutions (méthodes évolutionnaires). Chaque solution, initiale ou résultant des étapes suivantes, peut être évaluée au regard de la fonction d'utilité, i.e., du critère retenu.

- Il est ensuite nécessaire de déterminer les fonctions de recherche. Dans un cas, on définira la notion de voisinage, permettant de passer d’une solution à une autre, considérée voisine. Dans d’autres cas, on définira la fonction de croisement, les opérateurs de destruction, reconstruction... Afin de composer la structure même de l’exploration de l’espace, on parle de parcours d’un sous-ensemble de solutions.

Pour celui-ci, un nombre fini d’étapes (déterminé par un critère d’arrêt) sont appliquées pour explorer l’espace des solutions à partir de ce (ou ces) point(s) de départ. Le parcours est construit pour effectuer une succession d’améliorations locales, par sélection ou modification vers des solutions meilleures, et de perturbations (ou interdictions) afin de diversifier suffisamment la recherche et éviter les blocages dans un minimum local.

Ces approches, basées sur une exploration qui alterne guidage par amélioration de l’objectif et diversification/perturbation aléatoire afin d’élargir la recherche, sont très largement instanciées à travers la littérature et leur réussite tient essentiellement à leur adaptation fine au problème à adresser et à ses propriétés, ce qui fait l’objet de travaux très abondants, qui ne seront pas résumés ici.

Dans le cadre du projet avec le groupement Métalia, nous avons proposé une méthode tabou dédiée (cf Prot and Bellenguez-Morineau (2012)) pour le  $MMJS|r_j, d_j,intree, STsd, b|L_{max}$ . Celle-ci se base sur une représentation des solutions par la séquence de travaux qui seront ordonnancés au plus tôt, selon une approche série, i.e. tâche par tâche, ou parallèle, i.e., par groupement de tâches simultanées. Les opérateurs de voisinage mis en place, échange ou déplacement, viennent modifier la séquence de la solution courante pour en générer une nouvelle. Une autre opérateur est basé sur un changement de mode pour une opération donnée, basculant celle-ci vers une gamme alternative, autrement dit vers d’autres besoins en ressources.

### 3.4 Conclusion et perspectives

En conclusion sur cette première partie, nous avons discuté l’état des connaissances sur divers problèmes d’atelier, mettant en jeu uniquement des ressources machines, existant dans la littérature. En effet, les problèmes que nous avons abordés dans cette partie font l’objet de nombreuses publications et les pistes de recherches sont donc nombreuses.

Deux voix d’exploration semblent particulièrement pertinentes dans la ligné des travaux précédents. Tout d’abord, des pistes ont été ouvertes sur la caractérisation de la complexité de problèmes. Nous voyons dans le tableau 3.1, qu’il reste certains problèmes ouverts. Pour ces problèmes, comme pour d’autres, il serait en effet tout à fait essentiel de parvenir à établir à quelle classe de complexité ils appartiennent.

Ces résultats seraient également sans doute généralisables à d’autres problèmes proches ou d’autres extensions. Il s’agit d’une piste essentielle pour une meilleure connaissance générale des problèmes d’ordonnancement. Nous avons vu sur le problème industriel abordé

notamment que certaines contraintes étaient écartées pour obtenir une évaluation du problème. Or des contraintes telles que les graphes de précédence entre tâches, de type *intree* sur ce problème peuvent avoir un impact très fort. Afin de définir plus finement la frontière de complexité, nous prévoyons donc en particulier de travailler sur l'incidence des structures de graphes de précédence dans différents problèmes d'ordonnancement.

D'autre part, les modèles retenus ici ne font état d'aucune intégration des ressources humaines dans les problèmes d'atelier. Comme nous l'avons établi, cela tient souvent au choix fait par les décideurs de séparer ces deux problématiques. Cependant, comme nous l'avons constaté au cours du projet Prodflo, et comme cela est très bien mentionné dans Baptiste et al. (2005), de plus en plus de postes de travail se voient automatisés ou partiellement automatisés. Ce qui revient à dire que l'intervention des opérateurs n'est pas nécessaire en continu sur le temps de production d'une tâche. Ainsi, un opérateur pourra tout à fait superviser plusieurs opérations de production en parallèle.

Le cadre réel de ce genre de situation montre que beaucoup de décideurs préfèrent encore laisser le choix aux opérateurs de leur organisation. Cette spécificité est très souvent le fruit d'une difficulté de conduite du changement, les opérateurs opposant une force de résistance très importante à un ordonnancement très fin qui réduirait leur liberté au quotidien. Les outils qu'il est possible de proposer présentent en effet le risque direct de contraindre les opérateurs à un emploi du temps beaucoup moins flexible, ce qui entraîne en général en apparence une perte d'efficacité ou de réactivité. Or, dans ce type d'entreprise, l'expérience et l'autonomie sont des éléments centraux de l'efficacité des ateliers de production. D'autre part, la question de l'équité, réelle ou ressentie, est abordée et l'on montre ainsi que la transparence chiffrée peut avoir des conséquences sur la motivation des uns et des autres. Le fait de quantifier ce que chacun fait et le rendre visible aux yeux de tous est parfois perçu comme un outil de comparaison et laisse à penser qu'il est essentiel de trouver d'autres outils de mise en forme, voire de modélisation.

Cependant de nombreuses questions autour des ressources humaines sont déjà identifiées, et chaque fois qu'il est possible de lever ces difficultés managériales, mériteraient d'être investiguées au sein des entreprises. On peut tout d'abord considérer une meilleure utilisation des ressources disponibles au quotidien, notamment en évitant les temps de négociation entre opérateurs et responsable de production, ou directement entre opérateurs. De plus, la négociation pour la répartition du travail in situ a parfois pour conséquence une désorganisation par manque d'anticipation (par exemple, manque de matières premières au moment où l'opérateur se décide à prendre en charge un ordre de fabrication dont il n'était précédemment pas en charge, ou encore situation de blocage lorsqu'un opérateur a lancé plusieurs productions qu'il pense superviser, mais qui provoquent des étapes ultérieures une supervision simultanée, impossible en pratique).

Dans Baptiste et al. (2005), des problématiques émergentes avec ces nouvelles considérations sont évoquées. Permettre à un opérateur de superviser plusieurs tâches nécessitent par exemple de repenser les configurations de l'atelier en fonction. Selon les contextes industriels considérés, il peut également être pertinent de prendre en compte

au quotidien une construction de l'ordonnancement qui permette à chacun de maintenir ou élargir ses compétences. Ainsi, l'on peut dégager du temps ou planifier d'une part des formations en doublon, et d'autre part un exercice régulier des compétences pour chaque opérateur (cf. Pessan et al. (2007)).

Il reste donc beaucoup à faire sur ces aspects, afin d'imaginer des outils d'aide à la décision mis à disposition des décideurs, en lien avec des approches de conduite du changement très probablement. D'un point de vue théorique, cela doit s'appuyer sur une modélisation de tous les aspects de ces problématiques au sein d'un modèle adressable. Il est essentiel de parvenir à proposer une approche intégrée, évitant la résolution en deux phases de décision distinctes qui est actuellement courante. Les modèles proposés devront donc s'appuyer sur une fonction d'utilité très large et portant sans doute sur plusieurs aspects, afin de capturer tous les enjeux de ces problématiques intégrées. Les premières pistes dans ce domaine relèvent en général du champ de l'optimisation multi-objectifs, permettant ainsi de capturer différents enjeux, potentiellement conflictuels, des problèmes. Une autre piste intéressante est celle des systèmes multi-agents, permettant de considérer simultanément différentes fonctions d'utilité qui peuvent être propres à chaque agent, ou partiellement commune au sein du système.

## Chapitre 4

# Problème de gestion de projet

---

Ce chapitre aborde les problèmes de gestion de projet, et plus spécifiquement le problème de gestion de projet multi-compétence, proposé par Néron and Baptista (2002). Ce problème a précédemment fait l'objet de mes travaux de thèse, puis de la thèse de Carlos Eduardo Montoya Casas, que j'ai co-encadré avec David Rivreau, sous la direction de Christelle Guéret. Ce problème spécifique est une généralisation du problème classique de gestion de projet sous contraintes de ressources, qui fait encore l'objet de nombreuses investigations comme on peut le voir dans les travaux de Dhib (2013), ou dans Schwindt and Zimmermann (2015) par exemple. Ce problème d'ordonnancement peut en particulier s'appliquer à des projets mettant en jeu des ressources humaines. C'est donc assez naturellement que des travaux ont fait suite à ma thèse dans la continuité des perspectives d'alors, ou selon d'autres voies, notamment au cours de la thèse de Carlos Eduardo Montoya Casas. Ce chapitre reprend dans sa globalité les contributions proposées dans le champ de la gestion projet, pour en dégager les grands axes.

## 4.1 Introduction

Parmi le très large ensemble des problèmes d'ordonnancement, les problèmes de gestion de projet sous contraintes font l'objet de nombreuses investigations depuis quelques décennies maintenant. Les premiers outils dans ce domaine sont issues de préoccupations économiques et organisationnelles dans le domaine de l'ingénierie en particulier. On citera par exemple la méthode PERT (Project Evaluation and Review Technique), basée sur le chemin critique du graphe modélisant les contraintes de précédence entre les tâches afin d'évaluer la durée minimum d'un projet, mais également afin d'identifier les tâches critiques, c'est-à-dire ne pouvant admettre aucun retard sans retarder l'ensemble.

Cette première approche de la gestion de projet peut être vue comme une évaluation à ressources infinies, parfois abordée sous la dénomination Problème central de l'ordonnancement (Esquirol and Lopez (1999)) qui peut s'appliquer dans de nombreux contextes. Par la suite, ces problématiques se sont enrichies et diversifiées. Une littérature abondante existe sur différentes déclinaisons telles que l'optimisation des cash-flows, la gestion de porte-feuille multiple de projets, etc... Si l'on se focalise sur des considérations relatives à l'allocation de ressources matérielles et humaines, communément modélisées comme disponibles en quantité finie, et avec un objectif de minimisation de la durée totale, on notera en particulier le Resource Constrained Project Scheduling Problem (noté RCPSP). il s'agit d'un modèle reconnu (Blazewicz et al. (1983), Brucker et al. (1999), Kolisch and Padman (2001)) pour lequel la littérature abonde maintenant et dont les extensions sont nombreuses. Une large part d'entre elles est spécifiquement dédiée aux seules ressources renouvelables. Les ressources machines ainsi que les ressources humaines sont généralement considérées comme des ressources renouvelables au sens où elles peuvent être à nouveau disponibles après "consommation", i.e., après affectation à une tâche sur une période donnée.

Depuis les premiers modèles pour le RCPSP, de nombreux travaux ont vu le jour pour étendre les cas investigués. On pourra notamment se référer à Artigues et al. (2008)

pour un aperçu des variantes et extensions de la littérature. Parmi les problématiques considérées les plus connues, on trouve le RCPSP multi-mode, qui permet de prendre en compte pour chaque opération, ou activité, différents modes d'exécution. Comme nous l'avons mentionné précédemment pour le jobshop dans la partie 3.3.1, une tâche ou activité multi-mode est une tâche pour laquelle il existe plusieurs ensembles de ressources éligibles pour la réaliser dans un temps d'exécution qui est propre à l'ensemble de ressources choisies (Brücker and Neyer (1998)).

Le RCPSP multi-mode, initialement proposé par Talbot (1982), permet donc notamment une différenciation fine des ressources échangeables mais non équivalentes. En effet, chaque mode permet de cibler une ressource ou un ensemble de ressources à même de réaliser la tâche. Cependant pour chaque mode, la durée diffère a priori, ainsi que la nature ou la quantité de ces ressources. Celles-ci ne sont donc pas identiques, ni même strictement équivalentes au sens de machines parallèles classiques, puisqu'elles ne sont pas toujours capables de réaliser des ensembles identiques d'activités. Lorsque l'on considère ce type de modèles, il n'y a ensuite qu'un pas à franchir pour considérer des ressources humaines, qui, par nature, peuvent être échangées sans être tout à fait équivalentes sur toutes leurs activités ou disponibilités. Cependant, utiliser une approche de type multi-mode en différenciant non plus chaque type de ressources, mais chaque ressource individuellement lorsque celles-ci sont échangeables sur un large panel d'activités reviendrait à énumérer un très grand nombre d'alternatives pour une même exécution.

## 4.2 Gestion de projet multi-compétence

Cette constatation amène ainsi à proposer une modélisation permettant de s'affranchir de l'énumération des sous-ensembles alternatifs de ressources, en s'appuyant sur une définition des besoins en terme de compétences et non de ressources directement. C'est ce qu'ont fait Néron et Baptista (Néron and Baptista (2002)) en définissant le problème de gestion de projet multi-compétence, noté Multi-Skill Project Scheduling Problem (MSPSP), encore parfois évoqué dans la littérature en tant que MS-RCPSP (Myszkowski et al. (2014)), Multi-Skill Resource Constrained Project Scheduling Problem.

Ce problème de gestion de projet met donc en jeu des ressources qui peuvent être multi-compétentes, au sens communément admis pour les multi-purpose machines (cf. Jurisch (1992)). Ce qui signifie que chacune est apte à exercer différentes compétences, mais pas nécessairement toutes. Parallèlement, les activités considérées ont des besoins exprimés en terme de compétences et il est nécessaire d'affecter un sous-ensemble valide. Les ressources peuvent également admettre des périodes d'indisponibilité en nombre fini sur l'horizon considéré. Ces deux caractéristiques peuvent être vues comme un premier pas pour permettre de représenter des ressources humaines. Il reste un fort degré d'approximation, notamment quand on suppose que tout ensemble de ressources éligibles nécessite un temps équivalent pour accomplir une activité donnée par exemple. Cependant, ce problème permet d'adresser différents cas réels tels que certaines applications

ont pu le montrer (Dhib (2013); Bellenguez et al. (2005); Drezet et al. (2006); Pessan et al. (2007)), et présente un réel intérêt théorique.

### 4.3 Complexité

Les problèmes à contraintes de ressources tels que le RCPSP ont été montrés  $\mathcal{NP}$ -Difficile par Blazewicz et al. (1983). On peut ainsi montrer que tous les problèmes de gestion de projet qui en sont des extensions sont également  $\mathcal{NP}$ -Difficile, en particulier les extensions multi-mode ou multi-compétence. Pour ce dernier en effet, le RCPSP classique peut être vu comme un cas particulier du MSPSP où chaque personne ne maîtrise qu'une seule compétence.

Un autre point de complexité qu'il est pertinent de souligner relatif au MSPSP tient au fait que ces ressources multi-compétentes rendent encore le problème  $\mathcal{NP}$ -Difficile lorsque les dates de début des activités sont fixées. En effet, le problème d'affectation qui persiste alors peut être vu comme un problème de Fixed Job Scheduling Problem ou Interval Scheduling (Kolen et al. (2007)). Ce problème est  $\mathcal{NP}$ -Difficile dès lors que chaque tâche ne peut être réalisé que par un sous-ensemble des ressources existantes, ce qui correspond ici à l'ensemble des ressources maîtrisant les compétences requises. Il reste ainsi  $\mathcal{NP}$ -Difficile même lorsque les besoins des tâches sont unitaires, ce qui peut s'obtenir en décomposant chaque tâche du MSPSP à dates fixées en autant de sous-tâches que de ressources nécessaires. Déterminer s'il existe ou non une affectation des ressources pour satisfaire tous les besoins des activités n'admet donc pas de réponse en temps polynomial, sauf si  $P = NP$ . Cette particularité a un impact direct sur les approches pour une résolution exacte, puisqu'en se basant sur un schéma de branchement temporel, l'existence d'une solution n'est pas immédiate.

### 4.4 Résolution exacte

Face à un problème de l'envergure du MSPSP, toutes les approches basées sur des modèles mathématiques atteignent rapidement des limites qui ne les rendent pas exploitables en pratique, notamment à cause de la combinatoire forte sur les ensemble de personnes affectables à une tâche. Malgré tout, il est tout a fait intéressant de souligner les apports de ce type d'approche. La littérature fait état de nombreux modèles linéaires en nombres entiers adressant des problèmes proches. On soulignera notamment les travaux de Pritsker et al. (1969) pour le problèmes à contraintes de ressources. Ce modèle indexé sur le temps a permis de dériver une formulation du MSPSP efficace (Montoya et al. (2010)). Un tel modèle présente une dépendance forte aux données et notamment à l'amplitude des durées opératoires qui influent directement sur l'horizon de temps à considérer, i.e. sur le nombre de variables. Pourtant, cette formulation indexée sur le temps apporte les meilleurs résultats en terme de PLNE sur ce problème si l'on intègre un horizon corres-

pondant à une borne supérieure fournie par méthode approchée. Cela domine notamment des formulations basées sur la séquence des activités, telles que cela a été proposé par Kesen et al. (2010) ou des modèles de conservation de flot, que l'on peut trouver dans Artigues et al. (2003) ou pour des problèmes de tournées par exemple dans Toth and Vigo (2002).

Différentes recherches arborescentes ont également été proposées pour le MSPSP. Au cours de ma thèse, nous avons notamment proposé une approche de type Branch-and-Bound, basée sur la réduction des fenêtres de temps des activités, telle que proposée par Carlier and Latapie (1991) pour le RCPSP. Cette structure a le mérite de permettre l'utilisation de bornes inférieures efficaces, adaptées de la littérature. Une borne inspirée de Mingozzi et al. (1998) et faisant appel au graphe de disjonction, ainsi qu'une borne basée sur un raisonnement énergétique, très complémentaires, permettent un élagage fort. D'autre part, le problème d'affectation restant dans les noeuds feuilles s'apparent à un Fixed Job Scheduling Problem, qui en pratique peut être rapidement traité s'il est infaisable.

Par la suite, la thèse de Carlos Montoya a été l'occasion de proposer un Branch-and-Price basé sur le même schéma de branchement temporel, mais faisant appel à un modèle de génération de colonnes. Compte-tenu de la structure du MSPSP qui nécessite notamment une synchronisation entre les différentes personnes affectées à une même activité, il semblait peu propice de mettre en place une décomposition par ressource. Ce type de décomposition est pourtant largement investigué dans la littérature pour des problèmes comparables, et en général efficace. Dans le MSPSP cependant, cela revenait à laisser la synchronisation des ressources d'une même tâche dans le problème maître, ce qui présente une difficulté notoire. Pour cette raison et pour conserver le schéma de branchement temporel, le Branch-and-Price proposé s'appuie sur un problème maître centré sur la prise en compte des contraintes de précédence entre activités pour en déterminer les dates de début. Ainsi, la décomposition se fait par activité et le sous-problème généré doit permettre la création de colonnes correspondant à des sous-ensembles de ressources éligibles pour chaque activité considérée. Cette approche par Branch-and-Price présente des résultats intéressants et permet de fermer différentes instances (Montoya et al. (2013)).

Cependant, la méthode permettant d'atteindre les résultats les plus significatifs est le Branch-and-Cut issu de la thèse de Carlos Montoya. Cette approche conserve là encore un schéma de branchement basé sur les fenêtres d'exécution des tâches. Il s'agit ensuite dans cette approche de ne considérer dans le problème de départ que les variables de décision relatives aux dates de début des activités, pour venir itérativement ajoutées des coupes de différentes natures. Un premier ensemble de coupes est construit pour permettre tout d'abord de prendre en compte des contraintes cumulatives sur les ressources, soit en agrégeant les personnes par compétences, soit en agrégeant l'ensemble des personnes ressources. Par la suite, de nouvelles coupes sont ajoutées en chaque noeud pour tenir compte de sous-problèmes d'affectation sur différents intervalles de temps, interdisant certains ensembles d'activités en parallèle lorsque leur exécution simultanée est impossible.

## 4.5 Résolution approchée

Pour la plupart des méthodes approchées, et comme introduit précédemment (3.3.3), le principe repose sur une initialisation pertinente, en général sur des bases métier ou des heuristiques classiques, puis une exploration par voisinage, en vue d’obtenir des améliorations successives de la solution courante. Une des forces de ces méthodes approchées, utile dans le cas d’applications notamment, réside dans leur temps d’exécution contrôlé. Obtenir des résultats atteignant une qualité donnée requiert ensuite une adaptation très fine des paramétrages au problème adressé.

De nombreuses méthodes approchées ont été proposées pour le RCPSP et le RCPSP multi-mode dans la littérature. Tout d’abord des méthodes approchées basées sur des schémas série et parallèle, puis de nombreuses méta-heuristiques, notamment une méthode tabou par Klein (2000) pour le RCPSP. Comme établi, à la différence de ce dernier, le MSPSP présente la particularité de rester  $\mathcal{NP}$ -Difficile même lorsque les dates de début sont fixées. construire une séquence de tâches ne permet donc pas directement d’établir une solution réalisable. Le niveau supplémentaire dans le modèle que constituent les compétences rend exponentielle la construction d’une affectation des ressources humaines sur les demandes.

Ainsi, dans les méthodes approchées de résolution du MSPSP, pour éviter une énumération coûteuse des ensembles de personnes éligibles pour chaque tâche, nous avons proposé un critère heuristique de choix pour l’ensemble affecté. Cet indicateur a pour but de capturer aussi finement que possible le degré auquel les personnes seront nécessaires pour les différentes tâches sur l’horizon. Cela est directement lié à leurs compétences et aux besoins existant pour chacune de ces compétences. Les résolutions approchées proposées sont donc basées sur une construction de l’ensemble à affecter au plus tôt sur un ensemble de personnes déterminé via ce critère heuristique. Celui-ci permet d’attribuer un cout respectif à chaque personne, et l’ensemble éligible retenu est construit via un calcul de flot max à cout min dans un graphe biparti composé des personnes d’un côté et des besoins en compétence de l’autre, un arc existant si la personne est à même de satisfaire ce besoin (Bellenguez-Morineau and Néron (2014)).

Comme sur beaucoup de problèmes de la littérature, les différentes méthodes approchées proposées sont donc basées sur une liste de priorité permettant de placer les tâches une à une dans un schéma série ou par groupe dans un schéma parallèle. Cette liste de priorité a également été utilisée dans une méthode tabou, le voisinage consistant à modifier cette liste par des échanges ou des insertions. Ces différentes approches ont permis d’adresser des problèmes de taille relativement pertinente, pour proposer des solutions acceptables, atteignant l’optimum pour certaines d’entre elles.

## 4.6 Conclusions et discussions

Le RCPSP et ses extensions telles que le RCPSP multi-mode constituent un champ très vaste de recherche. Il constitue également, lorsque l'on considère des ressources renouvelables, une approche pour prendre en compte des ressources humaines. Ces modélisations se basent cependant sur une énumération des sous-ensembles de ressources qui peut devenir difficile à appréhender. La généralisation considérée à travers le MSPSP, investiguée de façon intensive sur le plan théorique et dans différents cas d'applications réelles (on citera par exemple Dhib (2013)), est ainsi un modèle pertinent et plus adapté pour considérer certains problèmes d'ordonnancement de projet, notamment sur ressources humaines. Au regard des cas d'application, et pour revenir plus en lien avec le transfert de technologie et le lien de la recherche fondamentale vers le génie industriel dans nos domaines, il est cependant nécessaire de souligner ses limites sur deux aspects.

En premier lieu, ce type de modèle, comme beaucoup d'autres, simplifie très fortement la notion de ressources humaines. Cela se décline sur plusieurs aspects : on notera d'abord bien évidemment les préférences et affinités qui ne sont ici pas du tout intégrées. Les compétences peuvent être binaires ou hiérarchiques (cf. Bellenguez and Néron (2005)), mais il n'est pas possible de prendre en compte l'envie d'une personne ou sa motivation à exercer cette compétence. D'autre part, et cela peut découler des préférences, ce modèle ne prend pas en considération les différences, de qualité ou de temps d'exécution, entre les personnes. On citera pour cela le mythe du mois-homme, bien connu pour le degré d'approximation qu'il comporte, puisqu'il s'appuie sur le fait que toute personne affectée à une tâche aurait besoin d'un temps de réalisation comparable et engendrerait un coût et une qualité comparables. Comme cela a été proposé pour d'autres modèles de gestion de projet (RCPSP et RCPSP multi-mode par exemple), il pourrait être pertinent de raffiner le modèle sur ces aspects de coût, de délai ou de qualité variables.

On mentionnera dans un second temps une problématique qui peut émerger sur tout problème d'ordonnancement et plus largement d'aide à la décision, mais qui est d'autant plus probable au regard des approximations précédemment citées et de la considération de ressources humaines. Il s'agit de la capacité à prendre en compte des aléas. En effet, il est parfois difficile de tenir les délais tels qu'ils avaient été définis, et comme toute ressource, les ressources humaines peuvent rencontrer des imprévues qui viennent modifier les disponibilités et l'efficacité. Sans pouvoir répondre à toutes les questions sous-jacentes de manière exhaustive, il semble pertinent d'ouvrir la brèche des approches pro-actives ou réactives dans la gestion de projet comme cela a été fait pour le RCPSP multi-mode par Deblaere et al. (2011) par exemple. Une première approche a été proposée pour le MSPSP (Bellenguez-Morineau (2008)), cependant il serait nécessaire d'approfondir cette investigation.

Ce type de problématique s'apparente tout à fait au constat qui est fait en ingénierie logicielle depuis quelques années sur une prévision trop fine en début de projet qui ne peut être tenue et qui peut être difficile à revoir en cours de projet. Une des réponses que l'on rencontre actuellement se trouve dans les méthodes de développement Agile. Ces

méthodes travaillent sur une planification de projet plus souple en amont et régulièrement révisée par l'équipe projet elle-même. On pourrait ainsi imaginer faire le lien avec les modèles et méthodes d'ordonnancement de projet de la littérature dans la première phase, afin d'avoir des évaluations aussi fines que possible du réalisable compte-tenu de données probables. Il s'agit clairement d'un outil de pilotage opérationnel qui a du sens d'autant plus si on y adjoint une capacité de ré-ordonnancement, ou ordonnancement réactif, en cas d'aléa quantifiable, ce qui est le cas lorsqu'une équipe de développement agile revoit la durée initialement allouée à une tâche par exemple.

Sur ce problème, les premières perspectives évoquées ici portent donc plutôt sur la conception du modèle et des méthodes dans l'objectif d'un transfert direct. Sur un plan plus académique, il serait cependant pertinent de poursuivre certaines pistes laissées ouvertes. Lors de la thèse de Carlos Montoya, nous avons notamment fait le choix d'une modélisation orientée sur les activités pour la partie génération de colonnes, qui semblait plus intuitive et permettait la construction d'un problème maître simplifié. Cependant les décompositions sur ressources se révèlent très efficaces sur certains problèmes, une colonne correspond dans ce cas à un sous-ensemble d'activités auquel la ressource peut être affectée. Il serait donc très intéressant de déterminer comment circonscrire au mieux la synchronisation des ressources dans le problème maître, afin de proposer une résolution la plus pertinente possible et en évaluer l'efficacité.

Enfin, une dernière voie d'investigation me tient particulièrement à coeur. Sans être tout à fait parvenu à déterminer exactement les seuils à placer, il est clairement admis que les graphes de précedence, et plus largement le type de précedence (généralisées, no-wait, etc...), ont une influence directe sur la difficulté de résolution d'une instance donnée. Il serait donc pertinent sur un plan théorique de déterminer les limites dans lesquelles ces précedences influent. Dans la lignée de ce qui a été évoqué précédemment sur les problèmes à machines parallèles un travail similaire pourrait être mené pour étendre les connaissances établies aux problèmes de gestion de projet. Permettre de caractériser la difficulté d'une instance et donc la méthode pertinente à appeler en fonction de la structure des précedences est ainsi un vaste champ de recherche à investiguer.

Deuxième partie

Problèmes de planification de  
Ressources Humaines

Cette seconde partie est dédiée à des problèmes en lien direct avec les ressources humaines qui sont ici explicitement considérées comme seules ressources nécessaires. Dans un premier temps, nous évoquons des problèmes d'ordonnancement de rendez-vous, au sein de la grande famille des problèmes de planification de personnel. Ces problèmes peuvent être vus comme des problèmes d'ordonnancement, mais présentent en général des objectifs souvent propres aux ressources humaines. Nous montrons donc tout d'abord la spécificité de ce type d'approche. Par la suite, le chapitre 6 aborde des problèmes sur ressources humaines qui intègrent les contraintes légales. Comme évoqué précédemment, cette construction de planning ou d'emploi du temps peut se faire de manière à couvrir une charge estimée, sans ordonnancement des tâches proprement dit. Dans ce cas, ces contraintes très fortes constituent le point central du problème, ce qui est spécifique aux problématiques sur ressources humaines. Nous verrons cependant comment il est possible d'intégrer ces contraintes tout en traitant l'ordonnancement des tâches à proprement parler.

## Chapitre 5

# Problèmes de planification de ressources humaines sans contraintes légales

---

Comme nous l'avons évoqué les ressources humaines ne peuvent pas être tout à fait vues comme des ressources matérielles quelconques. Le premier point qui rend les problèmes impliquant des ressources humaines particuliers à traiter tient souvent à l'objectif pris en compte. Les problèmes de planification de personnel adressent le lien avec les questions d'ordonnancement des tâches avec différents degrés d'agrégation, même si cela devient de moins en moins vrai avec des modèles qui se raffinent. Nous avons tout d'abord cherché à nous arrêter sur les problèmes n'impliquant pas la prise en compte des contraintes légales. Afin de contribuer en ce sens, il nous semblait notamment que les problèmes d'ordonnancement de rendez-vous constituaient un point d'entrée pertinent, pourtant encore peu investi. Ce chapitre est donc consacré aux travaux menés autour des problèmes de rendez-vous, notamment dans le cadre de session unique.

## 5.1 Introduction

La littérature fait état de beaucoup de travaux qui peuvent être vus comme de la planification de ressources humaines au sens large, puisqu'ils impliquent des notions de rencontres, de rendez-vous ou d'emploi du temps partagé. Cela correspond à de réels besoins dans de nombreux domaines applicatifs. Ce chapitre se focalise sur les cas de problèmes pour lesquels nous ne tenons pas compte de contraintes légales telles que amplitude horaire ou période de repos. Les disponibilités ou non des ressources sont donc considérées comme une entrée et non un élément de décision. En terme applicatifs, cela peut être le cas par exemple, lors de prise de rendez-vous simple ou multiple entre le milieu médical et les patients, forum ou salon professionnels, sessions de recrutements, mais également organisation de tournois, ou calendrier de rencontres entre partenaires d'un projet ou encore calendrier de formation, emploi du temps scolaire, etc...

Des travaux préliminaires menés en collaboration avec Christelle Jussien-Guéret et Olivier Péton, nous ont amené à travailler sur les bourses d'échanges de technologies (Guéret et al. (2009)). Par la suite, nous avons porté notre attention plus spécifiquement sur les problèmes de type speed-dating et job-dating. En partenariat avec la société West Speed-dating que nous avons rencontrée, une première modélisation dynamique a été proposée au cours du stage de fin d'études de Tanguy Lapègue. Les travaux menés ensuite au cours de la thèse d'Agnès Le Roux ont pour leur part plutôt porté sur un problème statique avec un critère de minimisation du plus grand retard, dont nous avons investigué la complexité et la résolution.

## 5.2 Positionnement des problèmes de rendez-vous

Parmi les nombreux problèmes de la littérature évoqués, on pourra faire une distinction majeure sur l'horizon de planification considéré tout d'abord. D'un côté, nous pouvons considérer les problèmes portant sur un horizon étendu, fini ou non, en général discontinu. Dans cette catégorie, on inclut les problèmes de tournois sportifs (tels qu'on

peut les trouver dans des travaux comme de Werra (1988), ou Della Croce and Oliveri (2006) par exemple). On peut également citer le problème spécifique nommé social golfer (Colbourn and Nonay (1997)), incluant lui aussi la planification de rencontres sportives, mais le nombre de participants ici est supérieur à deux, contrairement à un match au sens classique, et surtout la liste des participants de chaque rencontre fait partie des éléments de décision, un objectif étant ici que chacun rencontre un maximum de personnes différentes, sans obligation de les rencontrer toutes. A l'inverse, les problèmes de prises de rendez-vous épars (Sen and Durfee (1998)) considèrent que les participants sont fixés pour chaque rencontre, comme lors des rencontres sportives, l'objectif étant de placer ces rencontres au mieux. Tous ces problèmes présentent en général des critères intégrant la régularité, la notion de répartition dans le temps ou de délai de repos, ou encore la répétabilité d'un motif. Certains problèmes prennent également en compte des contraintes géographiques liées aux déplacements, ou bien des contraintes de disponibilité au sens large, des acteurs ou des équipements. On soulignera dans ces problèmes le fait que la planification résultante présente un degré très faible de tâches réalisées en parallèle. En effet, étant donné l'étendue de l'horizon de planification et les contraintes diverses, les plannings proposés sont très peu compacts, i.e. très étalés, ou répartis, dans le temps. Pour certains problèmes, les tournois notamment, c'est même un objectif de lisser les occurrences de rencontre afin de prendre en compte la fréquentation du public.

D'un autre côté, on trouve des problèmes de construction de planning sur un horizon fini et en général très compact. Les problèmes de salons professionnels, forums de recrutement, ou soirées de speed-dating ont en effet pour leur part, la particularité de se dérouler sur une unique session, généralement contrainte dans la durée, ce qui engendre de nombreuses tâches en parallèle, donc un planning davantage compact. Par compact, on entend le fait que cet horizon fini est déterminé pour être dédié à la planification de tâches correspondantes au problème et qu'aucune ne peut être planifiée en dehors, même si l'horizon peut malgré tout comporter des indisponibilités pour certaines ressources humaines impliquées. Parmi ces travaux, on peut citer : Rinaldi and Serafini (2007), Ernst et al. (2003), Bofill et al. (2014) et Katz et al. (2011) qui ont pour objet la planification de rencontres. Chacune de ces rencontres implique deux participants exactement. Nous incluons donc dans cette catégorie tout problème visant à ordonnancer un ensemble de rendez-vous par paire en une session cohérente sur un horizon fini. On peut également considérer dans cet ensemble, les problèmes d'emploi du temps (Even et al. (1976)), dans lesquels on doit planifier des rencontres entre deux "participants", classes et enseignants, avec certaines occurrences au cours de la session (la session étant classiquement la semaine, parfois le semestre, l'année ou la session de formation dont les dates sont bloquées).

Sans faire un état de l'art exhaustif, il existe ainsi différents travaux autour de la planification de rendez-vous, en particulier deux à deux, dont les contraintes sont similaires ou proches, mais les objectifs peuvent varier. En effet, certains sont centrés sur l'existence d'une solution, d'autres s'attèlent à la maximisation du nombre de rendez-vous qu'il est possible de placer, ou à la durée de l'évènement, ou encore aux attentes spécifiques des participants, telles que par exemple la minimisation des déplacements, des attentes ou autre mesure d'inconfort.

Ce second ensemble de problématiques en particulier, de par le délai très court qui est considéré, i.e. la compacité de l'évènement, permet de travailler sur un horizon pour lequel on considère que les personnes se sont rendues disponibles en amont, totalement ou partiellement. Cela exclut la prise en compte des repos, rotation et autres, et entre donc bien dans la catégorie des problèmes sans contraintes légales. Ainsi, on serait tenté de penser que ces problèmes peuvent être vus comme des problèmes d'ordonnement classiques sur ressources matérielles, ayant éventuellement des restrictions de disponibilité fixées en amont, sur lesquelles doit être réparti un ensemble fini d'activités. Cependant, deux points essentiels différenciant sont à mettre en exergue.

Lorsque l'on considère des multi-purpose machines en ordonnancement classique, des ensembles de ressources éligibles dans les problèmes de type Fixed Jobs Scheduling, ou des ressources multi-compétentes dans les problèmes de gestion de projet, on évoque toujours, pour une ressource donnée, sa capacité ou non à réaliser une tâche donnée. Cette capacité, ou compétence, n'est cependant pas une affectation directe, et notamment l'ensemble de tâches qui sera réalisé n'est pas directement déterminé, mais correspond simplement à un sous-ensemble de ces tâches éligibles. Or, du point de vue des problèmes de planification de rendez-vous ou d'emploi du temps que nous prenons en compte ici, la capacité d'une personne à participer à un rendez-vous implique directement son affectation si le rendez-vous a lieu. En d'autres termes, les personnes qui sont les ressources affectables pour un rendez-vous doivent toutes les deux, strictement, être affectées, pour que le rendez-vous soit réalisé. Cette particularité vient du fait que les ressources éligibles sont en réalité des ressources nécessaires, pouvant être assimilées aux machines dans un problème d'atelier classique, mais sont également les demandeurs, c'est-à-dire plutôt assimilables aux travaux.

Ce premier point permet également de souligner la deuxième spécificité des problèmes de rendez-vous, qui porte sur le critère considéré. En effet, les ressources impliquées étant également les travaux selon le point de vue pris, le critère considéré porte sur les "ressources", ce qui est peu commun en ordonnancement. De plus, il s'agit de ressources humaines, qui, en tant qu'être humain, ont une perception propre et spécifique de la qualité d'une solution. Sans entrer plus avant dans des considérations relevant de la sociologie ou de la psychologie, des critères particuliers apparaissent lorsque l'on travaille sur ce type de problème. En effet, les notions d'équité et de confort sont très largement présentes et participent directement à la satisfaction d'un participant face à un planning. On peut le voir par exemple sur des problèmes classiques tels que les problèmes d'emploi du temps, qui s'appuient en général sur des critères d'appréciation, tout comme sur les problèmes de session de rencontres, privées ou professionnelles. En effet, on trouve dans la littérature des critères portant sur la minimisation de l'amplitude horaire, de l'heure de fin, sur la maximisation de plages continues libérées, ou leur régularité... Autant de critères pour traduire le confort que les participants peuvent trouver à ce planning. D'autres critères d'équité entre participants peuvent apparaître.

Une fois ces aspects mis en exergue, il va de soi que le champ des problématiques à

investiguer peut encore rester pratiquement infini autour de la planification de rendez-vous en session unique. De nombreux travaux, notamment des méthodes de résolution approchées sont proposées dans la littérature. Il nous semblait cependant pertinent d'investiguer plus avant la complexité de ces problèmes dont certains s'avèrent polynomiaux. Pour cela, nous devons établir une classification des caractéristiques existantes. Les travaux menés au cours de la thèse d'Agnès Le Roux nous ont permis de proposer une catégorisation cohérente de ces problèmes. On s'appuiera notamment sur la définition suivante :

**Définition 4** *Un problème est un problème d'ordonnement de rendez-vous par paires, notés one to one Meeting Scheduling (1to1MS), s'il s'agit d'ordonner un ensemble de tâches de même durée sur un horizon fini, chacune des tâches faisant exactement appel simultanément à deux participants identifiés.*

Parmi les travaux ainsi considérés, différents cas sont à distinguer. Afin de simplifier la caractérisation de cette famille de problème, nous avons proposé d'étendre la notation à trois champs classique (Le Roux et al. (2015)), le premier champ étant 1to1MS, pour one to one meeting scheduling. Nous retrouverons dans le second champ différentes contraintes possibles. Nous différencions notamment le cas mettant en jeu une unique population, où chaque participant est susceptible de rencontrer chaque autre, du cas basé sur 2 populations, chacun ne rencontrant que les membres de l'autre population, qui implique un graphe des rencontres biparti. Le champ  $\beta$  est donc caractérisé par la définition du graphe de rencontre. Il est également possible de prendre en compte des retards des participants, qui peuvent être vus comme des dates de début au plus tôt sur les opérations dans les problèmes d'ordonnement classique, notées  $r_{i,j}$ . Enfin, une distinction forte existe également entre les cas prenant en compte une matrice de rencontre complète et les cas où certains rendez-vous sont interdits ou non-obligatoires. Dans le premier cas, tous les rendez-vous ont une durée unitaire, dans le second cas, ils peuvent se définir par une durée binaire de type  $o_{i,j} = 0, 1$ . Enfin, on retrouve dans le dernier champ les différents critères adressés selon les choix du décideur.

### 5.3 Complexité

Les problèmes d'ordonnement de rendez-vous que nous venons de définir englobent ainsi différents sous-cas, pour lesquels la complexité sous-jacente n'est pas équivalente. Nous avons concentré nos recherches sur les problèmes ayant pour objectif la minimisation du plus grand nombre d'attentes subis par les participants, prenant en compte différentes contraintes.

Comme évoqué dans la partie 3.2, établir la complexité d'un problème est un préalable à la construction d'une méthode de résolution pertinente.

Certains cas de 1to1MS, notamment ceux présentant une matrice de rencontre complète sur une population bipartie, peuvent être résolus en temps polynomial si les retards sont inexistantes ou limités sur une seule des deux populations. Nous avons en effet établi

que ces problèmes pouvaient être rapprochés de problèmes d’openshop spécifiques, et proposé en conséquence des algorithmes de résolution dont la complexité dépend uniquement de la taille des deux populations. Le cas biparti pour lequel les deux populations peuvent présenter du retard est en revanche toujours ouvert.

En revanche, dès lors que la matrice de rencontres n’est plus complète, le parallèle avec l’openshop n’est plus possible. Ces problèmes peuvent en revanche se rapprocher de problèmes de coloration d’arêtes. Nous avons notamment établi une réduction polynomiale entre le problème PREXT et le cas  $1to1MS|(U \cup V, E), bip, r_i^{(1)}, r_i^{(2)}|W_{max} = 0$ . Ce problème est le cas biparti, où les deux populations peuvent avoir des retards, notés  $r_i^{(1)}$  et  $r_i^{(2)}$ , et la matrice des rencontres n’est pas nécessairement complète, i.e., le graphe des rencontres est un graphe inclu dans le graphe biparti complet.

Le problème PREXT est un problème de coloration d’arêtes avec précoloration, qui se définit de la façon suivante : Il s’agit de déterminer la couleur à affecter à chaque arête d’un graphe, tel que deux arêtes adjacentes aient des couleurs différentes. Il existe une précoloration imposée pour certaines arêtes du graphe, le problème de décision correspondant est de déterminer s’il existe une coloration dont le cardinal de couleur est inférieur à  $k$ , respectant cette pré-coloration. Ce problème a été établi  $\mathcal{NP}$ -Difficile par Colbourn (1984). Une fois cette réduction établie, et par réduction successive, nous établissons les résultats de complexité portant sur tous les cas bipartis, avec ou sans retards, pour lesquels la matrice de rencontre est incomplète. Ces travaux, présentés dans Le Roux et al. (2015), font état des réductions proposées.

## 5.4 Méthodes de résolution

### 5.4.1 Résolution de problèmes d’ordonnement de rendez-vous statique

Comme nous l’avons évoqué la littérature fait état de très nombreuses contributions sur des problèmes de planification de rendez-vous plus ou moins proches de ces sessions de rendez-vous par paires. Si l’on s’intéresse à la minimisation du plus grand retard présenté dans ce chapitre, nous voyons en particulier les cas  $\mathcal{NP}$ -Difficile restant à investiguer pour proposer une résolution efficace. Malgré les limites évidentes de ces approches, nous avons travaillé sur différents modèles de PLNE, indexés sur le temps ou basés sur la date de chaque rencontre. Cependant, malgré l’ajout d’inégalités valides, ou de règle de dominance, ces modèles restent encore limités en terme d’efficacité. D’un point de vue théorique, il reste un travail conséquent à mener pour proposer de nouvelles règles d’élimination. La difficulté tient en effet au fait que la structure même de ce problème présente en général des instances admettant un nombre de solutions optimales très important. La difficulté tient donc ici plus au fait de prouver l’optimalité que d’atteindre une solution optimale. Il serait donc notamment très pertinent de mettre en place des règles de pseudo-dominance forte afin d’éliminer les solutions symétriques, ou équivalentes, pour

accélérer l'exploration de l'espace des solutions.

D'un point de vue plus pratique, la thèse d'Agnès Le Roux a également permis de proposer différentes méthodes approchées. Certains algorithmes glouton ont permis d'obtenir des bornes supérieures très efficaces, fermant ainsi de nombreuses instances pour le speed-dating, en complément de bornes inférieures construites par couplage notamment sur ce problème. Une méta-heuristique de type Limited Discrepancy Search a également été proposée. Cette approche, inspirée des travaux de Harvey and Ginsberg (1995), est basée sur une recherche arborescente. Celle-ci est tronquée par évaluation de l'écart de chaque noeud par rapport à un critère heuristique efficace, ici issu des bornes supérieures. Cependant, comme les méthodes précédentes, cette méta-heuristique peut être mise en échec sur certaines instances en raison du grand nombre de solutions équivalentes par rapport au plus grand retard. Il peut alors être nécessaire d'explorer l'arbre à une divergence trop élevée pour la compétitivité de la méthode.

De nombreux problèmes d'emploi du temps, ou autre problèmes proches ont également été investigués par des méthodes à base de programmation par contraintes. Ce type d'approche, en général efficace pour atteindre rapidement une solution réalisable dans un environnement contraint, existe par exemple également pour des problèmes de type sudoku ou carré latin. Ces derniers sont structurellement très proches de la planification de session de rendez-vous si l'on considère des plannings construits par rotation ou permutation des liste de rendez-vous. Il était ainsi pertinent de proposer une approche PPC pour ce problème, qui permet d'atteindre rapidement une solution réalisable. Malheureusement le nombre très important de solutions de plus grand retard équivalent vient ici encore limiter la performance globale et ralentir la résolution exacte.

## 5.4.2 Résolution d'un cas dynamique

Dans le cadre du stage de Tanguy Lapègue, nous nous sommes également intéressé à une version dynamique du problème de speed-dating (Lapègue et al. (2011)). Il s'agit dans ce problème de considérer le cas pour lequel les dates de disponibilités des participants ne sont pas connues au préalable. L'organisation de la session se fait donc en tenant compte des personnes présentes dès le début, puis les participants suivants sont intégrés au planning dès leur arrivée, ce qui vient modifier la solution sur l'horizon restant de la session. Cette approche réactive permet donc d'intégrer des participants au fur et à mesure du déroulement. Nous avons proposé pour cela une approche par programmation par contraintes. Tenant compte des rendez-vous déjà écoulés, ce modèle permet de proposer rapidement une solution réalisable pour la fin de session. Cette méthode dynamique a pour mérite de répondre au cas réel en temps limité. Il est cependant nécessaire d'en approfondir l'efficacité, notamment par une première approche pro-active tenant compte des inscriptions et donc des arrivées probables.

## 5.5 Conclusions et discussions

Nous avons ici abordé différentes approches relatives aux problèmes de planification de session de rendez-vous. Il s'agit d'une classe de problèmes dédiée à différentes applications réelles allant du speed-dating privé, au job-dating, en passant par les bourses d'échange, les forums b2b ou b2c. Les champs de transfert de technologie sont donc nombreux. Dans le cadre de travaux plus larges sur des problématiques d'ordonnancement, ces travaux étaient un pas significatif pour considérer plus spécifiquement les ressources humaines dans leurs particularités et notamment s'attarder sur une fonction objectif en rupture avec les critères fréquemment rencontrés en ordonnancement, malgré sa proximité apparente. La prise en compte de préférence entre les rencontres est également un élément de modélisation permettant de tenir compte des affinités et des souhaits des personnes impliquées, ou de leur satisfaction face à un planning donné, qui doit être davantage intégré dans les travaux à venir.

Cependant, comme beaucoup de problèmes d'emploi du temps, structurellement proches, le 1to1 meeting scheduling garde une construction relativement simplifiée par rapport à beaucoup de problèmes de planification de personnel portant sur un horizon élargi. En effet, l'une des pierres angulaires de la planification de personnels tient à la prise en compte des contraintes légales et contraintes organisationnelles qui rendent les ressources humaines disponibles par périodes discontinues qui sont à construire conjointement à l'affectation du travail. Il serait donc essentiel d'enrichir ce modèle afin de mieux tenir compte des indisponibilités, non uniquement en début d'évènement, mais quelle que soit leur place dans la session.

Un autre point, comme évoqué précédemment sur les modèles de gestion de projet, réside dans le fait de proposer des approches permettant de réagir aux aléas. Nous avons proposé une première approche permettant de réordonner la séquence de rendez-vous au gré des arrivées des participants. Celle-ci présente une certaine pertinence sur des événements de petites tailles, mais atteint ses limites dès lors que le nombre de participants croît, ne permettant plus d'informer chacun de façon itérative fluide de l'emploi du temps qu'il doit suivre. De plus, la mise à jour complète de la solution à chaque créneau sur une instance de grande taille paraît déraisonnable. Ainsi une approche pro-active, notamment basée sur les inscriptions préalables, couplée à cette méthode réactive, intégrant des critères de stabilité de la solution, pourrait aboutir à une amélioration significative de la solution finale et de la fluidité de l'évènement.

Au-delà de ces évolutions possibles du modèle proposé afin d'appréhender de façon plus fine les problématiques, certaines pistes doivent encore être poursuivies. Le premier point évidemment est de fermer le dernier sous-problème du point de vue de la complexité. En effet, la résolution exacte actuelle du problème avec rencontres interdites, quels que soient les retards, passe nécessairement par une approche exponentielle. Or, dès lors qu'il n'existe plus de rencontres interdites, et en l'absence de retard sur au moins une population, nous avons établi l'existence d'approches polynomiales. Ce sous-problème spécifique, dans lequel il n'y a pas de rencontre interdite mais des retards sur les deux populations,

reste donc le premier champ d'investigation sur lequel porter notre attention, afin de proposer l'approche la plus adaptée.

## Chapitre 6

# Problèmes de planification de ressources humaines avec contraintes légales

---

Ce chapitre porte sur les problèmes de planification de personnel incluant la prise en compte de contraintes légales, pour lesquels on trouve de nombreuses contributions. Nous nous intéressons dans un premier temps au positionnement relatif des modélisations existantes. Dans un second temps, nous proposons quelques contributions sur un problème spécifique de planification de personnel qui a la particularité forte d'inclure l'ordonnement des tâches explicitement et sans aucun agrégat dans la construction complète du planning des employés. Cette problématique est issue de la collaboration avec la société Biotrial, investiguée notamment au cours de la thèse de Tanguy Lapègue.

## 6.1 Introduction

La littérature portant sur la création de planning personnel ou d'emploi du temps intégrant les contraintes légales est très abondante. Cette large famille de problèmes est investiguée via différentes modélisations reposant sur des considérations réelles fortement contraintes. Ce type de problématique peut se rencontrer à travers de nombreuses applications dans le milieu de la santé, des transports, la gestion de plateau téléphonique ou autre société de service, etc... Il s'agira dans ces problèmes de couvrir un besoin en personnel par la construction d'emplois du temps respectant un ensemble de contraintes issues de la législation du travail notamment. Certaines modélisations proposent de générer des horaires affectés au personnel nominativement, tenant ainsi compte de contraintes propres à chaque employé. Selon les différents cas investigués, cette phase de construction des horaires de travail des employés peut être suffisante, ou couplée à une répartition des tâches aux employés dans les horaires construits.

Ainsi, parmi les problèmes de planification de personnels présents dans la littérature, nous nous arrêtons tout d'abord sur les problèmes considérant la création de ce qui est communément appelé "shift", i.e. de plages horaire travaillées, permettant de générer l'emploi du temps d'une personne. Par la suite nous abordons les problèmes intégrant un ordonnancement des tâches explicites, pour finir par aborder l'intégration de l'ordonnement de tâches à dates fixées. Comme nous venons de le mentionner la grande majorité des travaux dans ce domaine est directement liée à une ou des applications, qui, pour une très large majorité, donne lieu à des modélisations sous forme de problèmes  $\mathcal{NP}$ -Difficiles.

## 6.2 Problèmes de planification d'horaires d'employés

Sans faire de revue exhaustive, on peut faire état d'un nombre important de contributions traitant de problème de construction d'horaires de travail. Dans de très nombreux cas d'application, ces problèmes s'attachent dans leur ensemble à couvrir une charge estimée ou connue par la mobilisation de personnel sur des horaires respectant les contraintes légales et organisationnelles de ces dits personnels.

L'un des problèmes de planification de personnel de cette nature les mieux investigués est celui de la planification des services d'infirmières, nommé Nurse Rostering Problem

(NRP). Il existe de nombreuses modélisations reprises dans Burke et al. (2004), Cheang (2003) prenant en compte différentes versions de ce problème. Le NRP a pour objectif la construction des rotations des personnels pour couvrir des besoins auprès des malades, dans le respect des contraintes légales. Ces contraintes sont cependant en général simplifiées en amont par le biais de l'énumération d'un faible nombre de vacations possiblement affectables à un employé. Il est fréquent par exemple de trouver des modèles basés sur trois vacations possibles, ainsi qu'un panel de rotations, donc de successions de vacations, autorisées dans le respect des contraintes légales et du confort supposé pour l'enchaînement des vacations. Ces rotations doivent être organisées de manière à couvrir une charge estimée, sans affectation spécifiques des employés aux tâches, les employés étant en général considérés comme équivalents, sauf dans certains travaux qui tiennent compte de l'expérience.

De façon plus générale, on pourra également considérer dans cette catégorie les nombreux problèmes de construction d'horaires, de congés et autres, dans différents contextes, que l'on peut regrouper sous l'appellation Tour Scheduling Problem (Mabert and Watts (1982)). En effet, ces problèmes s'attachent à la construction des horaires de travail et/ou de repos, avec différents types de contraintes et de très nombreuses variantes à considérer selon les cas, mais également différents degrés de finesse dans les horaires qu'il est autorisé de construire.

Certains de ces modèles autorisent beaucoup plus de liberté dans la création d'horaire qu'on ne le trouve dans le NRP, parfois également plus de finesse, puisqu'il peut être nécessaire de construire également les horaires de pause. D'autres prennent également en compte des compétences différenciées sur les personnels et des besoins exprimés en terme de compétence ou de type de tâches à couvrir. Cela permet ainsi de modéliser le fait que les employés changent d'affectation au cours des horaires construits. Cependant, il s'agit dans ce cas en général de tâches longues pour lesquelles la préemption est autorisée. La couverture d'un même besoin peut donc être assurée par l'enchaînement de plusieurs affectations. Parallèlement, on peut en déduire que les personnes enchainent un nombre d'affectation restreint, puisque les plages considérées sont aussi longues que possible.

### 6.3 Problèmes incluant l'affectation de tâches

D'autres modèles ont été proposés pour des problèmes intégrant plus spécifiquement l'affectation des employés aux tâches. Il ne s'agit plus ici de plage de temps de large granularité, comme c'est le cas dans le Tour Scheduling Problem, mais bien de tâches spécifiques directement identifiées, de durée et de début variables, qui n'admettent en général pas de préemption, ou alors en certains points discrets uniquement. On retrouve ce type de tâches dans des problèmes tels que le Crew Scheduling Problem (Kohl and Karisch (2004)) ou autre problème de création d'horaires de chauffeur de bus par exemple. Dans cette dernière catégorie de problèmes, des équipages doivent être attribués à des transports dont les horaires sont déjà placés dans le temps. Il est donc nécessaire de construire

des emplois du temps cohérents, couvrant des enchaînements d'un faible nombre de plans de transports, et respectant les contraintes légales et organisationnelles des employés, ainsi que leur localisation.

Il existe également de nombreuses variantes autour de ce type de problèmes. La composante géographique vient cependant toujours ajouter une contrainte de cohérence restrictive sur les enchaînements possibles, même si le nombre de tâches (au sens trajet) affectées dans un horaire de travail reste faible. De plus, les critères pris en compte dans ces études s'attardent en général sur la rentabilité du planning proposé, soit par la minimisation du nombre d'employés ou d'horaires requis, soit par la faible longueur des horaires affectés, i.e. une minimisation des plages de battements entre trajets couverts.

Un point particulièrement important à souligner sur ces problématiques et qu'on ne retrouve pas dans d'autres considérations de planification de personnel tient à l'affectation de tâches à dates fixées, au sens où l'on peut le trouver dans les pb de Fixed Job Scheduling Problem et d'Interval Scheduling Problem (Kolen et al. (2007), Kovalyov et al. (2007)). En effet, dans les problèmes de transports pour lesquels on cherche à construire l'affectation des personnels, les plans de transports, i.e. les horaires de vols ou des passages de bus ou autre sont déterminés en amont afin de tenir compte des besoins et des capacités du réseaux ce qui constitue des tâches dont les horaires de début et les durées sont pré-établis. Ces tâches, parfois préemptables à certains endroits (changement de chauffeurs de bus par exemple) sont en général de durée élevée et un même personnel n'est affecté qu'à un petit nombre de tâches dans un horaire de travail.

## 6.4 Shift Desing Personnal Task Scheduling Problem

Ainsi, même pour les problèmes intégrant un ordonnancement des tâches sur les personnels, le nombre de tâches affectées par employé reste faible. De plus, la plupart de ces modèles prennent en compte des contraintes métiers spécifiques, notamment sur la localisation du personnel. La problématique ayant émergé dans le cadre du partenariat avec Biotrial a donc mis en évidence la nécessité d'une modélisation spécifique appropriée qui n'existait pas.

Ce problème intègre en effet des besoins à la fois sur un ordonnancement des tâches à dates fixées, avec une granularité très fine, sur les personnels compétents et à la fois sur la création d'horaires légaux et équitables. La très forte granularité s'explique par des contraintes métier spécifiques aux tests pharmaceutiques qui doivent être réalisés en vue de suivre l'évolution des dosages dans le corps humain. Les tâches ont donc des dates de début imposées à la minute près, et des durées qui ont une forte variation allant de quelques minutes à plusieurs heures. Pour s'y plier, et couvrir au mieux ces tâches, le décideur a fait le choix d'autoriser tout horaire de travail en terme de début et d'amplitude. Les seules restrictions portent sur la pénibilité trop élevée de commencer très tard dans la nuit pour finir en milieu de journée, et bien sûr l'amplitude maximale légale. tout autre

horaire permettant de couvrir des tâches peut être proposé, même si cela ne constitue pas des journées complètes puisque les personnels ont également des activités libres dans le temps et préemptables à réaliser, qu'ils intègrent à leur journée de façon autonome après la création des plannings.

Pour caractériser ce problème nous avons donc formalisé le modèle du Shift Desing Personal Task Scheduling Problem, que l'on notera SDPTSP par la suite. Ce problème se trouve à la jonction des problèmes de construction d'horaires et de problèmes d'ordonnancement de tâches sur les ressources humaines. On a des donc des contraintes de création d'horaires proches, voire équivalentes au Tour Scheduling Problem, mais également des contraintes équivalentes au Fixed Job Scheduling problem, avec prise en compte de compétence, i.e. de sous-ensemble de personnes éligibles. Bien évidemment ces deux catégories de problèmes sont  $\mathcal{NP}$ -Difficiles.

Le SDPTSP, problème généralisé que nous proposons, a été investigué au cours de la thèse de Tanguy Lapègue, tout d'abord sous sa version dédiée à la minimisation du nombre de tâches non affectées. Une modélisation basée sur un PLNE a permis notamment d'établir des preuves d'infaisabilité sur un nombre important d'instances, cependant le temps de résolution nécessaire ne permettait de passer à l'échelle dans un cadre industriel.

Par la suite, pour un nombre de tâches non affectées minimum, nous avons travaillé sur un modèle destiné à optimiser l'équité entre les personnels. Cette équité est construite pour capturer au mieux le fait que les ensembles de tâches affectées génèrent une charge de travail équivalente à une cible fixée par le décideur selon l'expérience et la disponibilité de chacun des personnels. Cette notion d'équité, longuement discutée avec les décideurs dès le départ du projet s'est affinée, pour s'arrêter sur la minimisation de l'écart entre ces écarts à la cible de chacun des acteurs dans nos investigations. Cependant si ce modèle a permis de capturer les aspects essentiels et points de blocages pris en considération par le décideur, il s'est avéré en fin de projet que certains aspects exclus de la modélisation devaient finalement être intégrés. L'étude du contexte industriel tel que les décideurs souhaitent le considérer maintenant met en évidence d'autres types de souhaits ou contraintes souples. Il s'agit en particulier de préférence sur les compétences exercées, de minimisation des heures supplémentaires, et de minimisation du nombre de personnes affectées de nuit.

### 6.4.1 Méthodes en deux phases

Comme nous l'avons évoquée précédemment, la littérature fait état de nombreux méthodes de résolution n'adressant pas tous les aspects d'une même problématique de façon intégrée. Il existe notamment de nombreux process de décision où la construction des horaires de travail est faite dans une phase préalable à l'affectation proprement dite du travail. Cette approche par décomposition semblait un levier pertinent pour construire une première méthode de résolution. Cette méthode de résolution heuristique est construite sur une première phase de construction d'horaires légaux pour chaque employé. Dans une

seconde phase, on cherche la meilleure affectation des tâches possible dans ces horaires, compte-tenu des compétences. Une méthode globale permet itérativement de venir corriger les horaires proposés dans la première phase afin de mieux résoudre le problème d'affectation des tâches dans la seconde phase. Cette méthode a montré une performance intéressante sur des instances de taille industrielle (cf. Prot et al. (2014)).

### 6.4.2 Approche intégrée

Lorsque cela est possible d'intégrer les différents niveaux d'une problématique en une phase, il est toujours pertinent d'investiguer cette voie et d'en mesurer le gain en terme d'efficacité. Nous avons donc tout d'abord construit un modèle par Programmation Par Contraintes pour ce problème. Puis, une approche de type Large Neighborhood Search basée sur ce modèle PPC a permis un gain significatif. Le principe est basé sur l'initialisation par le modèle PPC d'une solution réalisable. Celle-ci est ensuite partiellement détruite pour être améliorée. Nous avons utilisé deux opérateurs de destruction, le premier étant basé sur une fenêtre horaire, toutes les tâches la chevauchant sont alors désaffectées afin de reconstruire une meilleure affectation des personnes,. Le second est basé sur un sous-ensemble de personnes, dont on détruit l'affectation pour reconstruire une meilleure répartition. La réaffectation des tâches de la partie détruite de la solution est réalisée par le modèle PPC qui est appelé sur ce sous-ensemble de variables de nombreuses fois avec une recherche aléatoire dans un temps fini afin de générer rapidement des solutions sur ce sous-problème, la meilleure étant conservée. Au cours des itérations, on détruit donc successivement différentes parties de la solution, en insistant sur les zones contenant des tâches non couvertes, autant que nécessaire. Cette approche de résolution est actuellement la plus efficace sur ce problème et permet d'atteindre des résultats acceptables sur la problématique industrielle en quelques minutes (cf. Lapègue et al. (2014)).

## 6.5 Conclusions et perspectives

Ce chapitre fait état de nombreuses considérations autour de la planification de personnels sous contraintes légales, et notamment un modèle prenant également en compte l'ordonnancement conjoint de tâches à dates fixées. Ces investigations, menées dans le cadre d'un projet partenarial, ont donné lieu à transfert de connaissances via le développement d'un logiciel d'aide à la décision complet afin d'être directement utilisable par les décideurs. Ce modèle s'est montré pertinent et efficace dans son contexte d'application, néanmoins d'un point de vue théorique, il serait nécessaire d'investiguer plus avant des pistes en cours d'étude. Notamment, nous travaillons actuellement à la construction d'un modèle de génération de colonnes dédié au SDPTSP. L'objectif est ici de proposer une modélisation orientée sur les ressources. Chaque sous-problème est donc dédié à la création d'affectations possibles pour un personnel donné, intégrant les contraintes légales. Le problème maître est dans ce cas construit de manière à tenir compte de l'affectation globale des activités.

D'un point de vue applicatif, ce type de modèle reste toujours à affiner, notamment par le biais des fonctions objectifs considérées. Nous l'avons vu à travers le projet partenarial, mais également dans la littérature. Dans le domaine de la planification de personnels, il est en effet toujours délicat de parvenir à intégrer les contraintes souples sur les enchaînements, l'équité à court et long terme, la variabilité ou la stabilité, les habitudes, etc... Ces aspects sont souvent intégrés dans la littérature par le biais de la minimisation des violations, ce qui atteint ses limites lorsque le nombre de paramètres à considérer peut être si vaste que dans certains cas industriels.

Un de verrous qui persistent autour de ces problèmes, tient donc au fait que les modèles proposés ne parviennent jamais réellement à s'affranchir du contexte métier général et du contexte humain local spécifique. C'est ce point en particulier qui rend les approches toujours difficiles à transposer. Apporter une véritable avancée dans ce domaine tiendrait donc sans doute à la capacité à proposer une approche paramétrable qui resterait pertinente dans des contextes divers, connaissant chacun parfois de fortes variations. Cela passerait sans doute dans un premier temps par un recensement exhaustif et une classification universelle de problèmes, qui permette tout d'abord d'offrir une visibilité accrue. Si la construction d'un modèle unifié reste sans doute de l'ordre de l'utopie, une classification plus claire, telle qu'on peut la trouver sur les problèmes classiques d'ordonnement, permettrait en tout cas de clarifier le positionnement des problèmes et la comparaisons des méthodes ou des instances.

## Chapitre 7

# Conclusions et perspectives de recherche

---

Ce mémoire situe brièvement les contributions proposées dans le domaine de l'ordonnement et de la planification de personnel. Nous avons tout d'abord abordé les travaux proposés autour de problèmes d'ordonnement d'atelier et problèmes de gestion de projet. Par la suite, des contributions dans le cadre de la planification de rendez-vous ainsi que des contributions dans la construction d'horaires de travail avec affectation de tâches fixées dans le temps sont évoquées. Tous ces travaux se situent dans le giron de l'aide à la décision. Il s'agit de caractériser des problèmes et de déterminer quelles méthodes de résolution se trouvent les mieux à même d'accompagner la prise de décision pour un problème donné. Sans reprendre toutes les perspectives évoquées dans les différentes parties, nous souhaitons revenir sur certaines directions de recherche spécifiques.

Ces travaux portent sur des contextes très variés, avec des objectifs et des contraintes de différente nature. Nous avons par exemple, à travers les problèmes introduits au dernier chapitre, discuté la notion de qualité "ressentie" d'une solution et en particulier d'équité, qui peut également prendre des formes très variées selon le contexte. A travers différents champs d'investigation, nous avons montré qu'il est toujours délicat de déterminer le périmètre de ce qui doit être considéré ou non dans la construction d'une modélisation pour un problème donné. Il n'est bien sûr pas aujourd'hui possible d'envisager une réelle approche systémique, intégrant du plus petit détail au plus grand ensemble d'influence, par le biais des méthodes quantitatives de Recherche Opérationnelle.

Il serait cependant très pertinent de travailler davantage sur les modèles proposés pour mieux circonscrire ce qui doit entrer dans une problématique, en particulier lorsque des ressources humaines sont concernées. La notion de préférence, de souhait, les notions parfois conflictuelles d'intérêts personnels et d'intérêt du système, peuvent amener à intégrer bien des éléments. Une des réponses envisageables est bien évidemment celle des modèles et approches multi-objectifs. Il s'agirait donc ici d'un angle de travail qui peut être envisagé sur tous les modèles proposés dans ce mémoire. Dans une telle démarche, il serait ainsi possible d'intégrer différents aspects contradictoires par exemple mais également d'appréhender les contraintes dites "souples" autrement. De plus, l'utilisation d'approches permettant d'identifier un panel de solutions de compromis proposées au décideur donnerait ainsi une liberté accrue à celui-ci, ce qui peut être également un avantage managérial et une souplesse nécessaire dans un processus de décision complexe.

Une autre limite très forte des travaux proposés tient à leur aspect déterministe pour la plupart. Nous l'avons vu à travers les considérations en gestion de projet, ainsi qu'à travers les retards dans les problèmes de rendez-vous, mais cela peut être étendu à toute problématique. Il est toujours admis qu'il existe un écart significatif entre les données supposées d'un problème d'ordonnement et son réalisé. Comme mentionné, un ordonnancement n'est bien souvent qu'un outil de pilotage, de décision amont, qui doit être revu, affiné et décliné sur la réalité du terrain. On peut ainsi faire le lien avec les méthodes Agile, qui intègrent une large composante visant à réviser la durée et le périmètre des tâches d'un projet au fur et à mesure des avancées, selon des besoins qui changent et une expertise qui augmente. On peut également mettre cela en parallèle, dans les problématiques de production, avec les décisions plus stratégiques ou tactiques de planification de

production, ensuite déclinées en ordonnancement sur les ressources de production. Dans tous les cas, il y a un écart entre le prévisionnel et le réalisé qui peut mettre en échec tout un système de par l'ampleur de la désorganisation engendrée.

Une des pistes présentes dans la littérature, et effleurées sur certains problèmes présentés dans nos travaux, s'appuie sur des approches réactives, ou un couplage d'approches proactives-réactives. Il est ici question de construire des solutions ayant la propriété de permettre d'absorber au mieux des aléas si l'on peut en capturer la nature dans un premier temps, puis de recomposer une solution au mieux lorsque ces aléas surviennent. Dans le contexte hyper-connecté dans lequel le milieu économique évolue, ces méthodes ont d'autant plus de sens qu'il est ainsi très facile d'avoir connaissance des aléas rapidement et de les intégrer au système d'information, donc aux outils d'aide à la décision. Un des objectifs est donc de poursuivre les investigations menées autour des méthodes réactives tout d'abord, avec l'objectif de réparer une solution donnée tout en préservant au maximum sa stabilité. La notion de stabilité elle-même étant à caractériser, à investiguer de façon plus intensive, en particulier lorsque l'on souhaite intégrer les ressources humaines.

Si les deux précédents aspects sont tournés vers des outils et des approches permettant d'être au plus près des problèmes réels et donc d'affiner les modélisations et les méthodes de résolution, allant ainsi jusqu'à un degré d'intégration plus fort de l'environnement, il me semble également essentiel de contribuer en premier lieu sur les fondements théoriques des problèmes abordés. Nous avons notamment évoqué des travaux sur la frontière de complexité qui existe entre différentes classes de problèmes. Déterminer les composantes d'un problème qui font basculer sa complexité est un élément essentiel sur lequel il reste beaucoup à investiguer.

L'existence de précédence dans un problème d'ordonnancement vient par exemple très fortement impacter la résolution de celui-ci, imposant un ordre partiel dans la réalisation des tâches. Dans le cas de précédence généralisée, ou, à l'extrême opposé, de contraintes de type no-wait, on peut également imposer un délai plus ou moins sur l'enchaînement temporel des tâches. Les structures de précédence peuvent être multiple : chaîne, arbre, graphe Série-Parallèle ou autre... La première piste que nous souhaitons investiguer s'attache donc à déterminer, affiner, les conditions par lesquelles une structure de précédence va venir compliquer ou simplifier un problème donné. On peut voir par exemple dans Lawler and Labetoulle (1978), qu'il est possible d'utiliser certaines décompositions venant directement diminuer le degré de complexité d'un problème.

Dans cette lignée, la thèse de Tianyu Wang, qui sera initiée en septembre 2015 (co-encadrement avec Damien Prot), a pour objet l'utilisation de décomposition de graphe sur des problèmes à machines parallèles avec précédence. L'objectif sera ici d'identifier les approches de décomposition ou les propriétés pertinentes permettant de dégager des structures de graphe particulières sur certains problèmes pour en diminuer la complexité. Cela peut aussi, en appui sur des structures de précédence spécifiques, permettre de déduire des propriétés pertinentes des solutions.

Il est encore prématuré de décrire plus avant les résultats qui pourraient en découler mais ce champ d'investigation paraît tout à fait adapté à une exploration large. Comme mentionné dans l'introduction, il est avant tout ici question de faire preuve de créativité, afin de proposer de nouveaux outils de décomposition adaptés aux graphes orientés acycliques, afin d'imaginer de nouvelles approches, avant de faire appel à toute la rigueur des démarches classiques en Recherche Opérationnelle pour en montrer la pertinence et en évaluer les impacts.

# Bibliographie

- Allahverdi, A., Gupta, J., Aldowaisan, T., 1999. A review of scheduling research involving setup considerations. *OMEGA The International Journal of Management Science* 27, 219–239.
- Artigues, C., Demassez, S., Néron, E., 2008. *Resource-Constrained Project Scheduling. Models Algorithms, Extensions and Applications*. Wiley.
- Artigues, C., Michelon, P., Reusser, S., 2003. Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling. *European Journal of Operational Research* 149 (2), 249–267.
- Baptiste, P., Brückner, P., Chrobak, M., Dürr, C., Kravchenko, S., Sourd, F., 2007. The complexity of mean flow time scheduling problems with release times. *Journal of Scheduling* 10, 139–146.
- Baptiste, P., Giard, V., Haït, A., Soumis, F., 2005. *Gestion de production et ressources humaines*. Presses internationales Polytechnique.
- Bellenguez, O., Canon, C., Néron, E., 2005. Ordonnancement des formations des téléopérateurs dans un centre de contacts clients. In : *Actes des 6<sup>èmes</sup> journées nationales de la ROADEF (ROADEF'05)*. pp. 93–94.
- Bellenguez, O., Néron, E., 2005. Lower Bounds for the Multi-Skill Project Scheduling Problem with Hierarchical Levels of Skill. *Lecture Notes in Computer Science Springer-Verlag (3616/2005 : Practice and Theory of Automated Timetabling V : 5th International Conference, PATAT 2004, Pittsburgh, PA, USA, August 18-20, 2004, revised selected papers)*, 229–243.
- Bellenguez-Morineau, O., 2008. A reactive approach for the Multi-Skill Project Scheduling Problem. In : *7th international conference on the Practice And Theory of Automated Timetabling (PATAT'08)*.
- Bellenguez-Morineau, O., Néron, E., 2014. Tabu Search for the multi-skill project scheduling problem. *Journal of Operations and Logistics*.
- Blazewicz, J., Lenstra, J., Reusser, S., 1983. Scheduling projects subject to resource constraints : classification and complexity. *Discrete Applied Mathematics* (5), 11–24.

- Bofill, M., Espasa, J., Garcia, M., Palahi, M., Suy, J., Villaret, M., 2014. Scheduling b2b meetings. *Lecture Notes in Computer Science* in O'Sullivan, B., editor, *Principles and Practice of Constraint Programming*, 8656, 781–796.
- Brücker, P., Drexler, A., Möhring, R., Neumann, K., E., P., 1999. Resource Constrained Project Scheduling Problem : Notation, classification, models and methods. *European Journal of Operational Research* 149 (112), 3–41.
- Brücker, P., Neyer, J., 1998. Tabu-search for the multi-mode job-shop problem. *OR Spektrum* 20, 21–28.
- Burke, E., De Causmaecker, P., Vanden Berghe, G., Van Landeghem, H., 2004. The state of the art of nurse rostering. *Journal of Scheduling* 7, 441–499.
- Carlier, J., Latapie, B., 1991. Une méthode arborescente pour résoudre les problèmes cumulatifs. *RAIRO Recherche Opérationnelle* 3 (25), 311–340.
- Cheang, B., 2003. Nurse rostering problems - a bibliographic survey . *European Journal of Operational Research* 151(3), 447–460.
- Colbourn, C., 1984. The complexity of completing partial Latin squares. *Discrete Applied Mathematics* 8 (1), 25–30.
- Colbourn, C., Nonay, G., 1997. A golf design of order 11. *Journal of Statistical Planning and Interference* 1 (58), 29–31.
- Dauzère-Pérès, S., Paulli, J., 1997. An integrated approach for modeling and solving the general multiprocessor job-shop scheduling problem using tabu search. *Annals of Operations Research* 70, 281–306.
- Dauzère-Pérès, S., Roux, J., Lasserre, J., 1998. Multi-resource shop scheduling with resource flexibility. *European Journal of Operational Research* 107, 289–305.
- de Werra, D., 1988. Some models of graphs for scheduling sports competitions. *Discrete Applied Mathematics* 1 (21), 47–65.
- Deblaere, F., Demeulemeester, E., Herroelen, W., 2011. Reactive scheduling in the multi-mode RCPSP. *Computers and Operations Research* 1 (38), 63–74.
- Della Croce, F., Oliveri, D., 2006. Scheduling the Italian Football League : an ILP-based approach. *Computers and Operations Research* (33), 1963–1974.
- Dhib, C., 2013. Etude et résolution de problèmes d'ordonnancement de projets multi-compétences : intégration à un ERP libre. Ph.D. thesis, Université François Rabelais de Tours.
- Drezet, L.-E., Chesnes, D., Bellenguez-Morineau, O., 2006. An employee timetabling problem in a maintenance service of a software compagny. In : 6th international conference on the Practice And Theory of Automated Timetabling (PATAT'06).

- Ernst, A., Mills, R., Welgama, P., 2003. Scheduling appointment at trade events for the Australian tourisit commission. *Interface* 3 (33), 12–23.
- Esquirol, P., Lopez, P., 1999. L'ordonnancement. *Economica*.
- Even, S., Itai, A., Shamir, A., 1976. On the complexity of timetable and multicommodity flow problems. *SIAM Journal of Computing* 4 (5), 691–703.
- Garey, M., Johnson, D., 1978. “Strong” NP-completeness results : motivation, examples, and implications. *J. Assoc. Comput. Mach.* 3 (25), 499–508.
- Guéret, C., Bellenguez-Morineau, O., Pavageau, C., Péton, O., 2009. Optimisation de la planification de bourses d'échanges de technologies. In : Actes des 8<sup>èmes</sup> journées nationales de la ROADEF (ROADEF'09). pp. 177–178.
- Harvey, W. D., Ginsberg, M. L., 1995. Limited discrepancy search. In : Proceedings IJCAI'95. Morgan Kaufmann, pp. 607–613.
- Jurisch, B., 1992. Scheduling jobs in shops with multi-purpose machines. Ph.D. thesis, University of Osnabruck.
- Karp, R., 1972. Reducibility among combinatorial problems. R.E.Miller and J.W Thatcher (eds), *Complexity of computers computations*, Plenum Press, New York, 85–103.
- Katz, B., Rutter, I., Strasser, B., Wagner, D., 2011. Speed-dating. *Lecture Notes in Computer Science*, Springer Berlin Heidelberg in Pardalos, P. and Rebennack, S, editors, *Experimental Algorithms*, 6630, 292–303.
- Kesen, S., Das, S., Güngör, Z., 2010. A genetic algorithm based heuristic for scheduling of virtual manufacturing cells (vmcs). *Computers and Operations Research* 6 (37), 1148–1156.
- Klein, R., 2000. Scheduling of resource-constrained projects. Kluwer Academic Publishers.
- Kohl, N., Karisch, S., 2004. Airline Crew Rostering : Problem Types, Modeling, and Optimization. *Annals of Operations Research* 127, 223–257.
- Kolen, A., Lenstra, J., Papadimitriou, C., Spieksma, F., 2007. Interval Scheduling : A Survey. *Naval Research Logistics* 54, 530–543.
- Kolisch, R., Padman, R., 2001. An integrated Survey of deterministic project scheduling. *Omega* 3 (29), 249–272.
- Kovalyov, M., Ng, C., Cheng, T. C., 2007. Fixed interval scheduling : Models, applications, computational complexity and algorithms. *European Journal Of Operational Research* 178, 331–342.
- Lapègue, T., Bellenguez-Morineau, O., Guéret, C., 2011. Scheduling of a speed dating event. In : Book of abstracts OR 2011.

- Lapègue, T., Bellenguez-Morineau, O., Prot, D., 2014. Overview on methods for the shift design and personnel task scheduling problem with equity objective. In : MOSIM 2014.
- Lawler, E., Labetoulle, J., 1978. On Preemptive Scheduling of Unrelated Parallel Processors by Linear Programming. *JACM* 25, 612–619.
- Le Roux, A., Bellenguez-Morineau, O., Guéret, C., Prot, D., 2015. Complexity of one-to-one meeting scheduling problem with two types of actors. *Journal of the Operational Research Society*.
- Mabert, V. A., Watts, C. A., 1982. A Simulation Analysis of Tour-Shift Construction Procedures. *Management Science* 28 (5), 520–532.
- Mingozzi, A., Maniezzo, V., Ricciardelli, S., Bianco, L., 1998. An exact algorithm for the resource-constrained project scheduling problem based on a new mathematical formulation. *Management Science*, 714–729.
- Montoya, C., Bellenguez-Morineau, O., Pinson, E., Rivreau, D., 2013. Branch and price approach for the multi-skill project scheduling problem. *Optimization Letters*.
- Montoya, C., Bellenguez-Morineau, O., Rivreau, D., 2010. New models for the multi-skill project scheduling problem. In : EURO 2010.
- Myszkowski, P., Skowronski, M., Olech, L., Oslizlo, K., 2014. Hybrid ant colony optimization in solving multi-skill resource-constrained project scheduling problem . *Soft Computing* DOI 10.1007/s00500-014-1455-x.
- Néron, E., Baptista, D., 2002. Heuristics for the multi-skill project scheduling problem. In : International Symposium on Combinatorial Optimization (CO'2002).
- Pessan, C., Bellenguez-Morineau, O., Néron, E., 2007. Multi-skill Project scheduling problem and total productive maintenance. In : MISTA 2007.
- Pinedo, M., 2002. *Scheduling Theory, Algorithms and Systems*, second edition Edition. Prentice Hall.
- Potts, C., Kovalyov, M., 2000. Scheduling with batching : A review. *European Journal of Operational Research* 120, 228–249.
- Pritsker, A., watters, L., Wolfe, P., 1969. Multiproject scheduling with limited resources : a zero-one programming approach. *Management Science*, 93–108.
- Prot, D., Bellenguez-Morineau, O., 2012. Tabu Search and Lower bound for an industrial complex shop scheduling problem. *Computers and Industrial Engineering* 62(4), 1109–1118.
- Prot, D., Bellenguez-Morineau, O., Lahlou, C., 2013. New complexity results for parallel identical machines scheduling problems with preemption, release dates and regular criteria. *European Journal of Operational Research* 231, 2.

- Prot, D., Bellenguez-Morineau, O., Lapègue, T., 2014. A two-phase method for the Shift Design and Personnel Task Scheduling Problem with Equity objective. *International Journal of Production Research* <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2015.1037023>.
- Rinaldi, F., Serafini, P., 2007. Scheduling School meetings. *Lecture Notes in Computers Science* in Burke, E., and Rudova, H., editors, *Pratice and Theory of Automated Timetabling*, 3867, 280–293.
- ROADEF, 2011. *Le livre blanc de la Recherche Opérationnelle*.
- Schwindt, C., Zimmermann, J., 2015. *Handbook on Project Management and Scheduling*. Springer.
- Sen, S., Durfee, E., 1998. A formal study of distributed meeting scheduling. *Group Decision and Negotiation* 3 (7), 265–289.
- Talbot, F., 1982. Resource-Constrained Project Scheduling with time-resource trade-off : the non preemptive case. *Management Science* 28, 1197–1210.
- Tian, Z., Ng, C., Cheng, T., 2009. Preemptive scheduling of jobs with agreeable due dates on a single machine to minimize total tardiness 37, 368–374.
- Toth, P., Vigo, D., 2002. *The vehicule routing problem*. Society for Industrial Mathematics volume 9.

Chapitre 8

# Curriculum Vitae

---

Odile Bellenguez-Morineau

Née le 05 Avril 1979, à Poissy (78)

Adresse administrative :

Ecole des Mines de Nantes 4 rue Alfred Kastler

La Chantrerie - BP 20722

44307 Nantes Cedex 3

Tel. +33 2 51 85 83 32

Courriel : odile.morineau@mines-nantes.fr

## Curriculum Vitae

### Parcours / Formation

---

- depuis le 01/09/2007 : **Chargée de Recherche** à l'Ecole des Mines de Nantes.
- 2006-2007 : **1/2 Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche**, Département Informatique de l'Ecole Polytechnique de l'Université François-Rabelais de Tours.
- 2003-2006 : **Doctorat en informatique** – Université François-Rabelais de Tours.  
Titre : *Méthodes de résolution pour un problème de gestion de projet multi-compétence*  
Jury : Christian Artigues (rapporteur), Jacques Carlier, Stéphane Dauzère-Pérès (rapporteur), Michel Gourgand, Patrick Martineau (directeur), Emmanuel Néron (encadrant).  
Qualification aux fonctions de maître de conférences en 27<sup>ème</sup> et 61<sup>ème</sup> section.
- 2003-2006 : **Monitorat en Informatique**, Département de Sociologie de l'Université François-Rabelais de Tours.
- 2003 : **DEA d'Informatique** – Université François-Rabelais de Tours.
- 2003 : **Diplôme d'Ingénieur en Informatique** – Ecole Polytechnique de l'Université François-Rabelais de Tours.

### Enseignement / Activités pédagogiques

---

- **Responsable pédagogique** de l'option Gestion des Opérations en Production et Logistique de l'Ecole des Mines de Nantes depuis septembre 2009. Cette charge d'animation pédagogique et des Unités de Valeurs associées représente 100 Unités Pédagogiques par an.

#### Enseignements :

- **Ordonnancement** :
  - Formation d'ingénieur, 3ème année, 15h par an de cours et Travaux Dirigés en Français. (2009 à 2014)
  - master 2 MOST de l'Ecole des Mines de Nantes, 20h par an de cours et Travaux Dirigés en Anglais. (2009 à 2014)

- master 2 ORO de l’université de Nantes, 24h par de cours et Travaux Dirigés en anglais. (2009 à 2014)
- *Modèles et Algorithmes de Graphes* :
  - Formation ingénieur de l’Ecole des Mines de Nantes, 2ème année, 12h de Travaux dirigés (2007 et 2009)
- *Optimisation Discrète* :
  - Formation ingénieur de l’Ecole des Mines de Nantes, 2ème année, 18h de Cours et Travaux dirigés (2007 et 2009)
- *Systèmes Industriels et Logistiques* :
  - Formation ingénieur de l’Ecole des Mines de Nantes, 2ème année, Travaux dirigés et Travaux Pratiques (2007)
- *Modélisation Orientée Objet* :
  - Formation ingénieur informatique de Polytech’Tours, 2ème année, 30h de Travaux Dirigés (2004), 6h de cours et 48h de Travaux Dirigés (2006)
- *langage Java* :
  - Formation ingénieur informatique de Polytech’Tours, 3ème année, 27h de Travaux Pratiques (2005)
- *Réseaux de Pétri* :
  - Formation ingénieur informatique de Polytech’Tours, 2ème année, 24h de Travaux Dirigés.(2006)
- *Initiation à l’Informatique* :
  - L1 de sociologie, Université François-Rabelais de Tours, 24h Travaux Pratiques (2003 à 2006)
- *Informatique pour la Sociologie* :
  - L1 de sociologie, Université François-Rabelais de Tours, 40h Travaux Pratiques. (2003 à 2006)

**Encadrement de Projets tutorés :**

- Projet d’option, groupes de 4 étudiants sur 90h (2007, 2009, 2010, 2012, 2013)
- Projet d’option, groupes de 4 étudiants sur 60h (2014)
- Projet OSE, groupes de 4 étudiants sur 60h (2011)

**Encadrement de Stages :**

- 28 stages ingénieurs et masters. ( de 2005 à 2014)

**Jury des stages :**

- 20 stages opérateurs ( de 2012 à 2013)
- 120 stages en contexte international ( de 2009 à 2014)
- 129 stages de fin d’études ( de 2005 à 2014)

## Financement et valorisation de la recherche

---

- *Responsable scientifique du projet ProdfLOW.*

Objectif du projet : Développer un logiciel d’ordonnancement pour un problème d’atelier

complexe dans le milieu de la métallurgie (Projet porté par un éditeur). Responsabilité de l'équipe recherche en charge du développement des algorithmes d'ordonnancement pour la construction du moteur de l'application. Ce projet était financé par OSEO-innovation sur 18 mois. Montant pour l'équipe de recherche : 94 k€(2010-2011).

- *Responsable du Projet MAESTRO.*

Objectif du projet : Développer un logiciel de gestion des emplois du temps des personnels techniques et infirmiers dans un centre de tests pharmacologiques. J'ai pris la responsabilité de ce projet sous contrat direct sur 3 ans, financés par Biotrial. montant : 266k€(2011-2014).

- *Responsable d'un workpackage dans l'ANR CHARLIE, déposée en 2014 par l'IRT Jules Verne.*
- *Participant Pari Scientifique STORM, déposée par l'Ecole des Mines de Nantes en 2014 et 2015.*

## Participation à l'animation de la recherche

---

- Co-animatrice du groupe de travail Bermudes (rattaché aux GdR MACS et GdR RO) (2010-2014).
- membre du groupe de travail GOTHA (rattaché au GdR RO).
- Relecture d'articles pour des revues : European Journal of Operational Research, Computers and Operations Research, RAIRO-Operations Research, Journal of Operational Research Society, International Journal of Production Research, Journal of Scheduling, Annals of Operations Research.
- Relecture d'articles de conférences : ROADEF'05, PMS'10,ROADEF'10, ROADEF'12, ROADEF'13, ROADEF'14, MOSIM'10, MOSIM'12, MOSIM'14, CODIT'14.
- Membre du comité d'organisation de la conférence ROADEF'05 et ROADEF'15.
- co-organisation de tracks au titre de Bermudes (notamment dans les conférences ROADEF et MOSIM ainsi qu'aux journées GdR MACS).

## Encadrements

---

- Thèse de doctorat de Carlos Edouardo Montoya Casas (30%), *New methods for the Multi-Skill Project Scheduling Problem.* Bourse Région Pays de la Loire, dans le cadre du projet LigéRO. Co-encadrement : David Rivreau. Direction : Christelle Guéret. Soutenue en décembre 2012.
- Post-doc de Damien Prot (2011-2013, 24 mois)  
12 mois au sein du projet Prodfow, conception de méthodes de résolution pour un problème complexe d'ordonnancement d'atelier dans la métallurgie, puis 12 mois au sein du projet MAESTRO, pour la mise en oeuvre de méthodes pour le Shift Design and Personnel Task Scheduling Problem with Equity objective.
- Thèse de doctorat d'Agnès Le Roux (50%), *Ordonnancement de rendez-vous en tête à tête.* Bourse Ecole des Mines de Nantes. Direction : Christelle Guéret. Soutenue le 24 octobre 2014.

- Thèse de doctorat de Tanguy Lapègue (30%),  
*Planification de personnel avec affectation de tâches fixées : méthodes et application dans un contexte médical*. Bourse Ecole des Mines de Nantes (50%), financement Biotrial (50%).  
Co-encadrement : Damien Prot. Direction : Christelle Guéret. Soutenue le 24 octobre 2014.
- Thèse prévue : Houda Harbaoui (25%)  
Titre provisoire : *JobShop flexible avec blocage, application à une industrie agro-alimentaire*.  
Bourse Tunisienne de co-tutelle. Soutenance prévue en 2017.
- Thèse prévue : Tianyu Wang (50%)  
Titre provisoire : *Structure de graphe de précédence et décomposition en Ordonnancement*.  
Bourse du groupe des Ecoles Centrales et du China Scholarship Council (CSC). Soutenance prévue en 2018.

## Jury de thèse

---

- Membre du jury de thèse (examineur) de Cheikh Mohamed Dhib, titre : *Etude et résolution de problèmes d'ordonnancement de projets multi-compétences : intégration à un progiciel libre*. Université François-Rabelais de Tours. Avril 2013.

# Liste de publications

## Participation à un ouvrage

- Montoya, C., **Bellenguez-Morineau O.**, Pinson E. et Rivreau, D. *Chapitre 26 : Integrated Column Generation and Lagrangian Relaxation Approach for the Multi-Skill Project Scheduling Problem* dans C.Schwindt and J.Zimmermann, éditeurs, Handbook on Project management and Scheduling, to appear (2014).
- Bellenguez-Morineau O.** et Néron E. *Chapitre 10 : Multi-mode activities and multi-skill resources* dans C. ARTIGUES, S. DEMASSEY, E. NERON, éditeurs, Resource-constrained project scheduling -Models, algorithms, extensions and applications, Edition Hermès, Traité IC2 (2007).

## Revue internationale avec comité de sélection

- Prot, D., **Bellenguez-Morineau, O.** et Lapègue, T. A two-phase method for the Shift Design and Personnel Task Scheduling Problem with Equity objective, International Journal of Production Research. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2015.1037023> (2015).
- Bellenguez-Morineau, O.**, Chrobak, M., Dürr, C. et Prot, D. A Note on NP-Hardness of Preemptive Mean Flow-Time Scheduling for Parallel Machines. Journal of Scheduling, DOI 10.1007/s10951-014-0380-2 (2014).
- Le Roux, A., **Bellenguez-Morineau, O.**, Guéret, C., et Prot, D. Complexity of one-to-one meeting scheduling problem with two types of actors. Journal of the Operational Research Society. (2015).
- Lapègue, T., **Bellenguez-Morineau, O.** et Prot, D. A constraint-based approach for the Shift Design Personnel Task Scheduling Problem with Equity, Computers and Operations Research 40(10), 2450–2465. (2013).
- Montoya, C., **Bellenguez-Morineau, O.**, Pinson, E. et Rivreau, D. Branch and price approach for the multi-skill project scheduling problem, Optimization Letters (2013).
- Prot, D., et **Bellenguez-Morineau, O.** et Lahlou, C. A note on the paper "minimizing total tardiness on parallel machines with preemptions" by Kravechenko and Werner(2012), Journal of Scheduling 16, 4. (2013).
- Prot, D., et **Bellenguez-Morineau, O.** et Lahlou C. New complexity results for parallel identical machines scheduling problems with preemption, release dates and regular criteria, European Journal of Operational Research 231(2), 282–287. (2013).
- Prot, D., et **Bellenguez-Morineau, O.** Tabu Search and Lower bound for an industrial complex shop scheduling problem, Computers and Industrial Engineering, 62(4), 1109-1118, (2012).
- Bellenguez-Morineau, O.** et Néron, E. Tabu Search for the multi-skill project scheduling problem, to appear, Journal of Operations and Logistics (2014).

- Bellenguez-Morineau, O.** Methods to solve multi-skill project scheduling problem, PhD thesis, 4OR : A quarterly Journal of Operations Research, Vol 6, n°1, pp. 85-88 (2008).
- Bellenguez-Morineau, O.** et Néron, E. A branch-and-bound method for solving multi-skill project scheduling problem. RAIRO Operations Research, 41, pp. 155-170 (2007).
- Bellenguez, O.** et Néron, E. Lower Bounds for the Multi-Skill Project Scheduling Problem with Hierarchical Levels of Skill. Lecture Notes in Computer Science 3616/2005 : Practice and Theory of Automated Timetabling V : 5th International Conference, PATAT 2004, Pittsburgh, PA, USA, August 18-20, 2004, revised selected papers, pp. 229-243, Springer-Verlag(2005).

## Conférences internationales avec comité de sélection

- Lapègue, T., **Bellenguez-Morineau O.**, et Prot D. Overview on methods for the Shift Design and Personnel Task Scheduling Problem with Equity objective. *MOSIM 2014* (2014).
- Le Roux A., **Bellenguez-Morineau O.** et Guéret C. Valid inequalities and dominance rules for speed-dating linear models, *MAPSP 2013* (2013).
- Lapègue, T., **Bellenguez-Morineau O.** et Prot D. A large neighborhood search for the Shift Design Personnel Task Scheduling Problem with Equity. *MISTA 2013* (2013).
- Prot D., **Bellenguez-Morineau O.**, et Lapègue, T. Local search for a personnel scheduling problem with fixed jobs and an equity objective. *META 2012* (2012).
- Montoya, C., **Bellenguez-Morineau O.**, et Rivreau, D. Recovering Beam Search Approach for the Multi-Skill Project Scheduling Problem. *META 2012* (2012).
- Montoya, C., **Bellenguez-Morineau O.**, Pinson E. et Rivreau, D. Integrated Column Generation and Lagrangian Relaxation Approach for the Multi-Skill Project Scheduling Problem. *PMS 2012* (2012).
- Prot D., Lapègue, T. et **Bellenguez-Morineau O.** Lower bounds for a Fixed Job Scheduling Problem with an equity objective function. *EURO XXV* (2012).
- Lapègue, T., Prot D. et **Bellenguez-Morineau O.** A Tour Scheduling Problem with Fixed Jobs : use of Constraint Programming. pp 94-113. *PATAT 2012* (2012).
- Lapègue, T., et **Bellenguez-Morineau, O.** et Guéret, C. Scheduling of a Speed Dating event, Book of abstracts *OR 2011*. (2011).
- Montoya, C., **Bellenguez-Morineau O.**, et Rivreau, D. Branch and price approach for the multi-skill project scheduling problem. *Roadef 2011* (2011).
- Montoya C, **Bellenguez-Morineau O.** et Rivreau D. New models for the multi-skill project scheduling problem. *EURO 2010* (2010).
- Bellenguez-Morineau O.** A reactive approach for the Multi-Skill Project Scheduling Problem. *7th international conference on the Practice And Theory of Automated Timetabling (PATAT'08)* (2008).
- Pessan C., **Bellenguez-Morineau O.**, Néron E. Multi-skill Project scheduling problem

- and total productive maintenance. *MISTA 2007* (2007).
- Drezet L-E., Chesnes D. et **Bellenguez-Morineau O.** An employee timetabling problem in a maintenance service of a software compagny. *6th international conference on the Practice And Theory of Automated Timetabling (PATAT'06)*, Brno (Czech Republic) (2006).
- Pessan C., **Bellenguez-Morineau O.** et Néron E. Modélisation et Planification des opérations de réglage de machines lors du changement de série. Proceedings of the *6ème Conférence Internationale Francophone de Modélisation et Simulation Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes : Défis et Opportunités (MO-SIM'06)*, Rabat (Maroc) (2006).
- Néron E., **Bellenguez-Morineau O.** et Heurtebise M. Decomposition method for solving Multi-skill project scheduling problem. Proceedings of the *10<sup>th</sup> PMS'06 conference*, Poznan, Pologne (2006).
- Bellenguez-Morineau O.** et Néron E. Genetic algorithms for the Multi-Skill Project Scheduling Problem. Proceedings of the *10<sup>th</sup> PMS'06 conference*, Poznan, Pologne (2006).
- Bellenguez O.** et Néron E. Exact methods for a fixed job problem. *Models and Algorithms for Planning and Scheduling Problems (MAPSP'05)*, pp. 203-205, Siena (Italie) (2005).
- Bellenguez O.** et Néron E. Exact method for a fixed job problem. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM'05)*, Actes sur CD-Rom, Marrakech (Maroc) (2005).
- Bellenguez O.** et Néron E. An exact method for solving the Multi-Skill Project Scheduling Problem. *Operations Research*, pp 97-98, Tilburg (The Netherlands) (2004).
- Bellenguez O.** et Néron E. Lower Bounds for the Multi-Skill Project Scheduling Problem with hierarchical levels of skills. *5th international conference on the Practice And Theory of Automated Timetabling (PATAT'04)*, pp 429-432, Pittsburgh (USA) (2004).
- Bellenguez O.** et Néron E. Methods for solving the Multi-Skill Project Scheduling Problem. Proceedings of the *9<sup>th</sup> PMS'04 conference*, pp 66-69, Nancy, France, (2004).

## Conférences nationales avec comité de sélection

- Le Roux A., **Bellenguez-Morineau O.** et Guéret C., Limited Discrepancy Search pour un problème d'ordonnancement de rendez-vous, ROADEF 14 (2014).
- Lapègue, T., Prot D., et **Bellenguez-Morineau O.**, Dimensionnement d'équipe pour la réalisation d'étude de produits pharmaceutiques, ROADEF 14 (2014).
- Lapègue, T., Prot D., et **Bellenguez-Morineau O.**, Ordonnancement de personnel avec affectation de tâches : un modèle mathématique, ROADEF 13 (2013).
- Prot D., Lapègue, T. et **Bellenguez-Morineau O.**, Affectation de personnel médical à horaires fixés avec équilibre de charges, ROADEF 12 (2012).
- Le Roux A., **Bellenguez-Morineau O.**, Guéret C. et Prot D., Complexité de problèmes d'ordonnancement de rencontres de type speed-dating, ROADEF 12 (2012).

- D. Lemoine, **O. Bellenguez-Morineau**, C. Guéret, N. Najid, Résolution d'un problème réel de type job-shop flexible multi-ressources, ROADEF 10, Toulouse (2010).
- Guéret C., **Bellenguez-Morineau O.**, Pavageau C., Péton O. and Poncelet D. Optimisation de la planification de bourses d'échanges de technologies. *Actes des 8<sup>èmes</sup> journées nationales de la ROADEF (ROADEF'09)*, pp 177-178, Nancy, France (2009).
- Bellenguez-Morineau O.**, Néron E. Condition de coupe dans la procédure par séparation et évaluation pour le problème de gestion de projet multi-compétence. Accepté à la conférence conjointe Francoro V / ROADEF'07, pp 63-64, Grenoble, France (2009).
- Bellenguez-Morineau O.**, Néron E. et Couety P. Méthodes de décomposition pour un problème d'ordonnancement multi-compétence à dates de début fixées. *Actes des 7<sup>èmes</sup> journées nationales de la ROADEF (ROADEF'06)*, Actes sur CD-Rom, Lille, France (2006).
- Bellenguez O.**, Canon C. et Néron E. Ordonnancement des formations des téléopérateurs dans un centre de contacts clients. *Actes des 6<sup>èmes</sup> journées nationales de la ROADEF (ROADEF'05)*, pp 93-94, Tours, France (2005).
- Bellenguez O.** et Néron E. Méthodes approchées et bornes inférieures pour le problème de gestion de projet multi-compétence. *Actes de l'École d'Automne de Recherche Opérationnelle*, pp 39-42, Tours (2003).