



HAL
open science

Résolution efficace de variantes du problème de dimensionnement de lots

Ayse Akbalik

► **To cite this version:**

Ayse Akbalik. Résolution efficace de variantes du problème de dimensionnement de lots. Recherche opérationnelle [math.OC]. Université de Lorraine, 2020. tel-03103361

HAL Id: tel-03103361

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03103361>

Submitted on 8 Jan 2021

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.

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

UNIVERSITE DE LORRAINE

Résolution efficace de variantes du problème de dimensionnement de lots

Ayse AKBALIK

COMPOSITION DU JURY

Mme. ALPAN Gülgün, *Rapporteur*, Prof, G-SCOP, Institut Polytechnique de Grenoble, France
Mme. KEDAD-SIDHOUM Safia, *Rapporteur*, Prof, CEDRIC, CNAM Paris, France
M. SAUBION Frédéric, *Rapporteur*, Prof, LERIA, Université d'Angers, France
M. KACEM Imed, *Examineur*, Prof, LCOMS, Université de Lorraine, France
M. OLIVEIRA José Fernando, *Examineur*, Prof, University of Porto, Portugal
M. QUILLIOT Alain, *Examineur*, Prof, LIMOS, ISIMA, France
Mme. YAMAN PATTERNOTE Hande, *Examineur*, Prof, ORSTAT, KU Leuven, Belgium

Habilitation préparée au laboratoire LCOMS dans l'équipe DOP
Soutenue le 21 septembre 2020
Ecole Doctorale IAEM, Spécialité Informatique



*A ma très chère famille et
aux mouettes et sardínhas de Matosínhos
qui m'ont accompagnée et motivée
tout au long de cette rédaction...*

Préface

Ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches (HdR) présente une description synthétique des activités de recherche et d'enseignement que j'ai menées depuis la fin de ma thèse de doctorat, soutenue en 2006 à l'INP de Grenoble. Durant mes années de doctorat au sein du Laboratoire GILCO (actuellement G-SCOP), j'ai étudié le problème de dimensionnement de lots (LSP, Lot Sizing Problem en Anglais) en utilisant les outils de la recherche opérationnelle (RO) et de l'optimisation combinatoire. Parmi ceux-ci, je peux plus spécifiquement citer la programmation dynamique, la programmation linéaire en nombres entiers (PLNE), le développement d'heuristiques, l'analyse de complexité, les propriétés d'optimalité. Ce premier grand projet m'a initié à la recherche et m'a donné le goût de faire « de la bonne recherche » grâce mon super directeur de thèse Bernard Penz, avec qui je continue encore à collaborer. Le grand message que j'ai retenu durant ces années à GILCO était « Ne publie que si tu as des choses très importantes à montrer aux autres, sinon continue à travailler ». Le slogan qui résumerait l'essence de nos travaux de recherche communs menés avec Christophe Rapine depuis plusieurs années, dans une éternelle réflexion scientifique sans limite. Les cinq ans qui ont suivi la fin de ma thèse ont été remplis d'expériences, de voyages scientifiques à travers le monde et de rencontres avec des chercheurs extraordinaires, avant de me stabiliser en région Lorraine sur un poste titulaire en 2011. Je détaille brièvement ce parcours dans les paragraphes suivants.

Un mois après ma soutenance de thèse, j'ai intégré l'équipe de Y. Pochet et L.A. Wolsey à CORE, UC Louvain, pour mettre en œuvre une approche polyédrale sur une variante du LSP que j'avais auparavant traité en utilisant de la programmation dynamique. J'ai proposé des inégalités valides, certaines fois des facettes (si on avait de la chance !) pour enlever les parties des polyèdres associés à mes problèmes qui ne contenaient pas la solution optimale et renforcer ainsi les formulations. Nous avons également trouvé quelques enveloppes convexes intéressants pour certains cas simplifiés du LSP avec une structure de coût FTL (full than truckload). Une année de recherche postdoctorale au sein de cette équipe mondialement connue pour ses travaux sur la programmation mathématique appliquée au LSP m'a procuré une énorme confiance en moi : du moment où l'on voulait réussir, avec beaucoup de patience, de persévérance et de travail acharné, tout était possible.

Les deux ans qui ont suivi cette expérience inoubliable où l'apprentissage de nouvelles méthodes était au quotidien, je me suis lancée dans une nouvelle aventure scientifique. J'ai décidé de complètement changer ma thématique de recherche afin de me renouveler en me lançant à l'apprentissage d'un nouveau domaine et de nouveaux outils d'optimisation : un vrai challenge scientifique et personnel. J'ai été recrutée comme chercheuse postdoctorale (en parallèle d'un poste ATER) au sein du LTM (Laboratoire des Technologies de la Microélectronique, Grenoble), majoritairement composé de chercheurs CNRS, d'ingénieurs de CEA en physique, microélectronique et nanotechnologie. J'ai appris de nouvelles techniques de modélisation mathématique qui s'inscrivaient dans le domaine de la programmation non-linéaire appliquée aux problèmes inverses. Avec notre équipe, nous avons conçu un outil informatique (codé en Matlab) pour aider les chercheurs travaillant en ellipsométrie à calculer l'épaisseur des couches minces qu'ils déposaient sur les plaques de silicium, destinés à fabriquer des circuits électroniques dans le secteur du semi-conducteur. Un grand merci à Patrick Schiavone de m'avoir donné le goût de recherche sans limite et extra-polyvalente !

L'année suivante fut celle d'un long séjour dans mon pays natal en Turquie. J'ai été recrutée comme enseignante-chercheuse invitée à TOBB University of Economics and Technology, Ankara. C'était une année extrêmement chargée mais pleine de satisfactions professionnelles et personnelles. J'ai réalisé mon service d'enseignements en Anglais et en Turquie et j'ai partagé mes connaissances acquises à l'étranger avec mes étudiants Turcs avides d'apprendre et curieux de tout, j'ai ainsi pu contribuer à l'éducation et à la recherche dans mon pays d'origine. Nous avons aussi lancé des projets de recherche avec quelques collègues avec qui je continue encore à collaborer (voir Fleet Sizing dans mes bilans de recherche).

Finalement, ce voyage à travers le monde géographique et celui de la recherche a (presque) pris fin lorsque j'ai eu un poste de MCF à l'Université de Metz (actuellement Université de Lorraine) en 2011. Initialement rattachée au laboratoire LGIPM pour la recherche, j'ai demandé mon rattachement au laboratoire LCOMS en 2018. Les quelques années noires et démoralisantes de l'ambiance du LGIPM ont été balayées par ce changement. Un grand merci à Imed Kacem qui a joué un grand rôle lors de cette transition avec un soutien continue sur tous les plans. J'effectue mes enseignements dans différents établissements rattachés à l'université de Lorraine (voir plus loin pour plus de détails). Je continue à faire de la recherche très activement et je collabore avec différentes équipes de chercheurs à travers le monde : France, Etats-Unis, Angleterre, Portugal, Tunisie, Turquie. J'ai effectué deux séjours de quelques mois à l'université de Porto pour lancer de nouvelles collaborations, et aussi pour observer de nouvelles méthodes pédagogiques d'apprentissage. Ces 7 mois passés à Porto étaient remplis de bons souvenirs avec des collègues extrêmement sympas, modestes, compétents et très travailleurs : un vrai enrichissement et épanouissement scientifique et personnel, sans oublier la beauté spectaculaire de la ville elle-même !

A travers ce voyage scientifique, je peux classer mes travaux de recherche à l'intersection des disciplines de la recherche opérationnelle, de l'informatique décisionnelle et de l'optimisation combinatoire. Mes thématiques de recherche s'articulent autour des applications issues de la gestion des chaînes logistiques, de la planification de production, de problème de découpe et de packing, sans oublier le dimensionnement des flottes de véhicules. J'utilise les outils et méthodes d'optimisation afin de résoudre les problèmes décisionnels issus de ces thématiques.

Ce mémoire est composé de trois grandes parties. Après un CV synthétique, la Partie I se concentre sur la description de mes activités de recherche et d'enseignement. Dans la Partie II, je donne un bilan de mes travaux de recherche en m'appuyant uniquement sur mes résultats publiés dans les journaux reconnus du domaine. Dans cette partie je développe trois grands axes : problème de dimensionnement de lots avec limitation des ressources, puis avec différents modes d'approvisionnement, et dimensionnement de flottes de véhicules. Dans la Partie III, je présente mes projets de recherche pour les années à venir en détaillant les perspectives de recherche pour les différents projets que je mène actuellement, et que je mènerai sans doute encore les quelques années qui viennent. Enfin, je finalise ce manuscrit avec une conclusion et quelques perspectives à plus long terme. Je vous souhaite une lecture plaisante et fructueuse !

Ayşe AKBALIK, Juin 2020

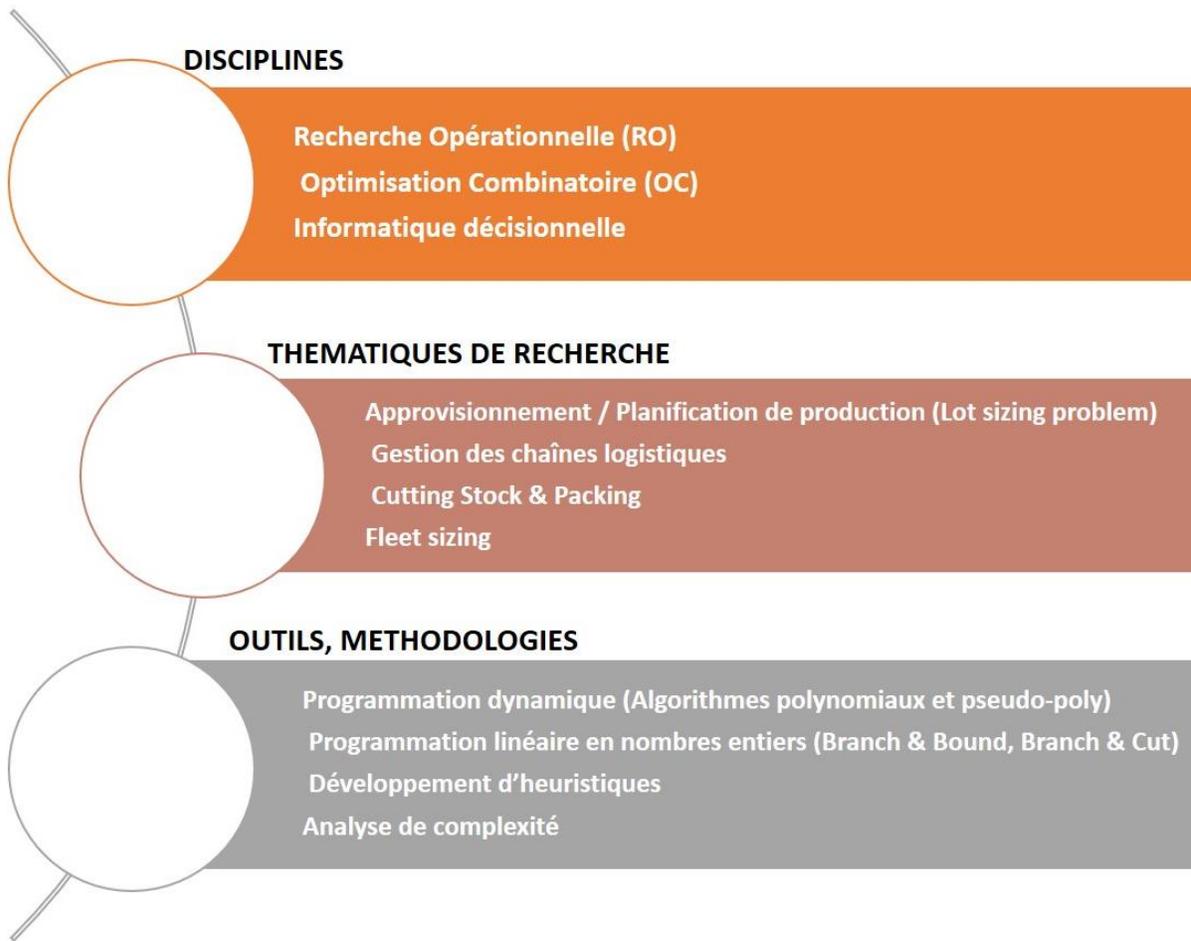


Figure 1. Mes thématiques de recherche et méthodologies utilisées.

Table des matières

| | |
|---|------------|
| PARTIE I – Description de mes activités | 10 |
| CV synthétique | 11 |
| Activités de recherche | 14 |
| Activités d’enseignements et d’administrations | 26 |
| PARTIE II – Bilan de recherche | 33 |
| Problème de dimensionnement de lots avec limitation de ressources | 45 |
| Problème de dimensionnement de lots avec différents modes d’approvisionnement | 68 |
| Dimensionnement de flottes de véhicules | 86 |
| PARTIE III – Projets de recherche | 91 |
| Conclusion générale | 113 |
| Références | 114 |
| Annexe | 120 |

Liste des Figures

| | |
|---|----|
| Figure 1. Mes thématiques de recherche et méthodologies utilisées. _____ | 4 |
| Figure 2. Mes axes de recherche autour du LSP couplé à d'autres problèmes. _____ | 34 |
| Figure 3. Illustration du coût de production ou d'approvisionnement pour le LSP. _____ | 35 |
| Figure 4. Network flow representation for ULSP. _____ | 38 |
| Figure 5. Classification du LSP mono-produit dans le cas déterministe. (ULSP: Uncapacitated LSP, EOO: Economic Order Quantity, WW: Wagner & Whitin, CLSP: Capacitated LSP, ELSP: Economic LSP, DLSP: Discrete LSP) _____ | 40 |
| Figure 6. Planning de production optimal pour ULSP et CLSP. _____ | 41 |
| Figure 7. Illustration du calcul des tailles de lot au sein des ERP (ERP : Enterprise Resource Planning, PP: Production Planning, MRP : Material Requirement Planning, LSP : Lot sizing problem) _____ | 41 |
| Figure 8. Mes thématiques de recherche détaillées dans cette partie « Bilan de recherche ». _____ | 44 |
| Figure 9. Représentation en réseau de ULSP en utilisant la propriété ZIO. _____ | 45 |
| Figure 10. Illustration d'une solution dominante pour energy-LSP avec des paramètres d'énergie stationnaires et r, g et $K=0$. _____ | 53 |
| Figure 11. Illustration d'un sous-plan (u, v) et quelques informations nécessaires pour le programme dynamique. _____ | 53 |
| Figure 12. Représentation d'un graphe acyclique où le plus court chemin entre $(u=1, k=0)$ et S est calculé, pour $M=2$ machines. _____ | 54 |
| Figure 13. Illustration d'une solution dominante pour energy-LSP avec des paramètres d'énergie stationnaires, dans le cas général. _____ | 55 |
| Figure 14. Système de multi-machines avec capacité limitée et demande multi produits. _____ | 57 |
| Figure 15. Illustration of small-bucket problems for multi-item LSP. _____ | 58 |
| Figure 16. Notre contribution dans la littérature du PLSP. _____ | 60 |
| Figure 17. Structure de la chaîne logistique étudiée dans le cadre du projet avec EMI-Rabat. Source : Akbalik et al. (2008). _____ | 62 |
| Figure 18. Illustration de différents types de périodes pour CLSP-IB. _____ | 65 |
| Figure 19. Illustration des 4 sous-plans possibles pour le CLSP-IB. _____ | 65 |
| Figure 20. Illustration network flow pour un sous-plan (u, v) donné. _____ | 66 |
| Figure 21. Intervalle du DLSP (Discrete Lot Sizing Problem) à résoudre pour un sous-plan (u, v) donné. _____ | 66 |
| Figure 22. Illustration de coût 'fixed charge' pour le LSP classique (à gauche) et coût par morceaux FTL (à droite). _____ | 68 |
| Figure 23. Planning de production optimal pour ULSP et LSP-B. _____ | 69 |
| Figure 24. La structure du plus court chemin appliqué au LSP. Un arc entre les nœuds u et v contient le coût du sous plan (u, v) . _____ | 69 |
| Figure 25. La structure d'un sous plan (u, v) pour le CLSP avec capacité de production et taille de batch constante. Source : Akbalik et Rapine (2012), OR Letters. _____ | 70 |
| Figure 26. Modification du coût d'approvisionnement du LSP-B après la signature d'un contrat type CRC (Contrat de Réserve de Capacité). _____ | 70 |
| Figure 27. Illustration du système à N machines étudié dans Akbalik et Penz (2009) avec son équivalence au système à N fournisseurs. _____ | 71 |
| Figure 28. Nos résultats pour ULSP-B avec B_t . Notations utilisées : B_t : taille de batch à la période t , f_t : coût de setup à t , k_t : coût fixe par batch à t , p_t : coût unitaire de production, h_t : coût unitaire de stockage. Source : Akbalik et Rapine (2013). _____ | 76 |
| Figure 29. Illustration du système étudié pour le LSP-BCR entre un détaillant et un fournisseur. _____ | 78 |
| Figure 30. Positionnement du LSP-BCR (LSP avec approvisionnement par batch sous le contrat de réservation de capacité). _____ | 80 |

| | |
|---|-----|
| <i>Figure 31. Transformation d'une instance d'un problème LSP-BCR à une instance du problème CLSP-B. Source : Akbalik et al. (2017).</i> | 82 |
| <i>Figure 32. Structure du système étudié dans le cadre du LSP-BB (buyback et production par batch intégrés au LSP)</i> | 83 |
| <i>Figure 33. Positionnement de notre problème LSP-BB dans la littérature. Source : Manuscrit de thèse de Farhat (2019).</i> | 84 |
| <i>Figure 34. Différentes extensions du LSP-B avec contrat buyback étudiées par M. Farhat dans sa thèse de doctorat (2019).</i> | 85 |
| <i>Figure 35. Illustration du système initial de distribution et de stockage utilisé par le prestataire logistique avant l'optimisation.</i> | 87 |
| <i>Figure 36. Illustration du nouveau système centralisé où les détaillants ne stockent plus et le DC devient le livreur principal.</i> | 87 |
| <i>Figure 37. Problème de tournée de véhicule avec des véhicules à mono et multi compartiments.</i> | 88 |
| <i>Figure 38. Illustration for our project "Semi Fluid Packing".</i> | 107 |
| <i>Figure 39. 3D Packing for semifluids, Photo by Kevin Frayer/Getty Images.</i> | 109 |
| <i>Figure 40. Problème intégré CS-LSP avec approvisionnement des panels rectangulaires transportés dans des batchs qui sont chargés dans des véhicules et Cutting Stock 1D et 2D.</i> | 110 |

Liste des Abréviations

| | |
|---------|--|
| CRC | Contrat de Réservation de Capacité |
| CSLP | Capacitated Lot Sizing Problem |
| CLSP-B | Capacitated Lot Sizing Problem with Batch production |
| DC | Dépôt Central |
| DLSP | Discrete Lot Sizing Problem |
| ERP | Enterprise Resource Planning |
| FTL | Full Truck Load |
| IRP | Inventory Routing Problem |
| JAT | Juste à Temps |
| LSP | Lot Sizing Problem |
| LSP-BR1 | LSP avec Batch replenishment et contrat Buyback type 1 |
| LSP-BR2 | LSP avec Batch replenishment et contrat Buyback type 2 |
| LSP-BR3 | LSP avec Batch replenishment et contrat Buyback type 3 |
| LSP-BCR | LSP avec Batch replenishment et CRC |
| LSP-CRC | LSP avec Contrat de Réservation de Capacité |
| LSP-SW | LSP avec Stepwise cost structure |
| LSP-B | LSP with Batch replenishment |
| LSP-BB | LSP with Batch replenishment under Buyback contract |
| MRP | Material Requirement Planning |
| MCV | Multi Compartment Vehicle |
| OFB | Only Full Batch |
| PCC | Plus Court Chemin |
| PP | Production Planning |
| PRP | Production Routing Problem |
| PD | Programme dynamique |
| PLNE | Programme linéaire en nombres entiers |
| PLSP | Proportional Lot sizing and Scheduling Problem |
| QEC | Quantité Economique de Commande |
| RO | Recherche Opérationnelle |
| SCV | Single Compartment Vehicle |
| ULSP | Uncapacitated Lot Sizing Problem |
| VRP | Vehicle Routing Problem |
| WW | Wagner-Whitin cost structure |
| ZIO | Zero Inventory Ordering |

Liste des Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1. Nos résultats pour le CLSP avec capacité constante, avec et sans capacité de stockage. Source : Akbalik et al. (2015a). | 64 |
| Tableau 2. Résultats de la littérature pour le ULSP-IB avec capacité de stockage dépendant de temps. Source : Akbalik et al. (2015b). | 67 |
| Tableau 3. Nos résultats pour le CLSP avec une capacité de production et une taille de batch constantes. Source : Akbalik et Rapine (2012). | 73 |
| Tableau 4. Résultats expérimentaux, comparaison entre DP (dynamic programming algorithm) et MILP (PLNE) | 74 |
| Tableau 5. Classification des travaux sur ULSP-B avec des tailles de batch B stationnaires. Source : Akbalik et Rapine (2013). | 76 |
| Tableau 6. Etude comparative pour les résultats ULS-MMB. Indexation par i correspond au mode i utilisé, et t à la période en question. Source : Akbalik et Rapine (2018). | 77 |
| Tableau 7. Classification des travaux pour LSP-CR et LSP-BCR (LSP avec CRC et approvisionnement par batch à la fois) | 80 |
| Tableau 8. Algorithmes en temps polynomial proposés dans Akbalik et al. (2017) EJOR en comparaison avec la littérature. | 81 |
| Tableau 9. Résultats de NP-complétude proposé dans Akbalik et al. (2017) EJOR. | 81 |
| Tableau 10. Résultats expérimentaux pour LSP-BCR. Comparaison du DP (dynamic program) et du MILP (PLNE). | 82 |
| Tableau 11. Résultats théoriques des travaux de thèse de doctorat de Farhat (2019). | 85 |
| Tableau 12. Positionnement de notre étude au sein de l'état de l'art du problème de "Fleet Sizing & VRP". | 89 |
| Tableau 13. Mes projets de recherche et collaborations actuels (2019). | 95 |

PARTIE I

Description de mes activités

CV synthétique
Activités de recherche
Activités d'enseignements

Partie I.1

Curriculum Vitae

Mme AKBALIK Ayse

Née le 14.04.1980, mariée, 2 enfants

Maître de conférences à l'Université de Lorraine

Membre du Laboratoire LCOMS, équipe DOP

Mots-clés : Logistique, Recherche opérationnelle

ORCID : <http://orcid.org/0000-0003-0538-7112>



PARCOURS

Je suis maître de conférences à l'université de Lorraine depuis Septembre 2011 et je suis rattachée à la faculté UFR Math-Info-Méca et au laboratoire LCOMS. J'ai passé 7 mois à l'université de Porto (Portugal), à la faculté d'ingénieurs FEUP comme chercheuse invitée. J'ai obtenu mon doctorat à Grenoble INP en 2006 sur l'optimisation des chaînes logistiques et plus particulièrement sur la résolution efficace du problème de dimensionnement de lots. J'ai effectué une année postdoctorale à l'Université Catholique de Louvain, dans le centre de recherche CORE. J'ai également travaillé deux ans au Laboratoire des Technologies de la Microélectronique (CNRS, CEA) sur des problèmes d'optimisation en nano-microélectronique. J'étais enseignante-chercheuse dans le département de Génie Industriel à TOBB University of Economics and Technology, Ankara pendant une année. J'ai enseigné dans divers domaines en optimisation et en génie industriel dans plusieurs établissements. Mes thématiques de recherche concernent l'optimisation et outils d'aide à la décision pour les systèmes de production, de stockage et de transport. J'ai publié à ce jour 16 articles dans des revues internationales.

FORMATION, DIPLOMES ET ACTIVITES PROFESSIONNELLES DETAILLES

- 2018 –** Maître de conférences à l'Université de Lorraine, Chercheuse au Laboratoire LCOMS
- 2018 – 2019** Chercheuse invitée à l'Université de Porto, Faculté d'ingénieur FEUP (3 mois + 4 mois)
- 2011 – 2018** Maître de conférences à l'Université de Lorraine, Chercheuse au Laboratoire LGIPM
- 2010 – 2011** Enseignante-chercheuse, TOBB Université d'Economie et de Technologie, Turquie
- Sept. Août Contrat d'un an avec 168 h de cours magistraux en licence et en master de recherche en Anglais et en Turc. Activités de recherche au Département de Génie Industriel
- 2009 – 2009** Chercheuse post-doc, Laboratoire des Technologies de la Microélectronique-LTM,
- Avril Sept. Grenoble, CNRS-CEA (avec J.H. Tortai et P. Schiavone)
Projet sur l'optimisation des mesures ellipsométriques
- 2007 – 2008** Chercheuse post-doc, LTM, CNRS (avec J.H. Tortai et P. Schiavone), Grenoble
- Sept. Août Projet dans l'équipe de lithographie, résolution d'un problème inverse, non-linéaire.
- 2007 – 2008** ATER (demi-poste), Polytech'Grenoble, Université Joseph Fourier
- Sept. Août Modules enseignés : RO, Traitement du Signal, Optimisation des Flux Physiques
- 2006 – 2007** Chargée de recherche, CORE (Center for Operations Research & Econometrics)
- Oct. Août Université Catholique de Louvain, Belgique (CORE fellowship)
Année post-doctorale dans l'équipe de L.A. Wolsey et Y. Pochet sur l'approche polyédrale
- 2003 – 2006** Vacataire, ENSGI, INP Grenoble et Polytech'Grenoble, Université Joseph Fourier
- 215h effectuées pendant ma thèse en RO, en optimisation, gestion de production
- 2003 – 2006** Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Laboratoire G-SCOP
- Oct. Sept. « Optimisation de la gestion intégrée des flux physiques dans une chaîne logistique : extensions du problème de dimensionnement de lot » **Financé par une allocation MENR**
Dirigée par **Bernard Penz et Van-Dat Cung**. Soutenue le 7 Septembre 2006.
- 2003 – 2004** Cours suivis en Master RO Combinatoire et Optimisation – ENSIMAG, INP Grenoble
- Ordonnancement, PLNE, Théorie des graphes, Optimisation combinatoire
- 2002 – 2003** DEA en Génie Industriel à l'ENSGI, INP Grenoble, mention bien.
- Sept. Juil. Financée par une **bourse d'excellence du gouvernement Français**.
- 1998 – 2002** Diplôme d'ingénieur en Génie industriel, Université Galatasaray, Istanbul, Turquie

MOTS CLES DE RECHERCHE

Outils Programmation dynamique, Programmation linéaire en nombres entiers, Inégalités valides, Problème inverse non-linéaire, Analyse de complexité.

Thématiques Problème de dimensionnement de lots, Planification de la production et du transport, Gestion des chaînes logistiques, Cutting stock, Packing, Fleet sizing, Micro-nano électronique.

PROGRAMMATION, OUTILS INFORMATIQUES

Système d'exploitation : Windows, Linux

ERP : OpenERP, Logiciel Adonix, SAP

Logiciels Optimisation : ILOG-Cplex (+interface Concert Technology), OPL-Studio, Xpress-MP, Xpress IVE, Mosel (éditeurs & solveurs linéaires), GIMP, Porta (étude des polyèdres et des polytopes)

Langage : Java, Matlab, Python (élémentaire)

Simulation : ARENA

Autres : Microsoft Office Tools, LaTeX, Xfig, DeltaPsi (ellipsometric optimization software), Origin, CRAFT.

Pendant le cursus universitaire : Oracle SQL, Lindo, Maple, SAP/R3, Promodel, MedModel

COLLABORATIONS INTERNATIONALES DEPUIS 2004

| | | |
|---------------------|-----------------|--|
| 2018-présent | Portugal | Collaboration avec l'Université de Porto, Faculté d'ingénieurs FEUP |
| 2016-présent | Turquie | Collaboration avec l'Université Galatasaray, Istanbul |
| 2012-présent | Tunisie | Collaboration avec l'Ecole Nationale d'ingénieurs de Tunis (OASIS) |
| 2010-présent | Turquie | Collaboration avec TOBB Univ. of Economics and Technology |
| 2008-2009 | US | Travail avec deux membres de LTM à Georgia Tech, Atlanta |
| 2006-2007 | Belgique | Collaboration avec CORE, UC Louvain, Louvain-la-Neuve |
| 2004-2008 | Maroc | Projet avec le Départ. de GI de l'Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Rabat |

LISTES DES ETABLISSEMENTS D'ENSEIGNEMENT DEPUIS 2004

Grenoble INP – ENSGI, France / Polytech'Grenoble, Université Joseph Fourier, France / TOBB ETU-Ankara, Turquie / Ecole des Mines de Nancy, France / ENSAM-Campus de Metz, France / EMSI-Casablanca, Maroc / IULT Wroclaw, Pologne / UFR-MIM (Mathématiques-Informatique-Mécanique) de l'université de Lorraine

LANGUES PRATIQUEES

| | | | |
|-----------------|-------------------|------------------|-------------|
| Turc | langue maternelle | Espagnol | élémentaire |
| Français | bilingue | Portugais | élémentaire |
| Anglais | très bon niveau | Italien | élémentaire |

Partie I.2

Activités de recherche

Mes activités de recherche s'inscrivent dans les thématiques de la planification de production, de la gestion de stock et de transport. Mon domaine d'application principal est le problème de dimensionnement de lots (Lot Sizing Problem en Anglais, LSP). Je travaille sur ce problème en y intégrant diverses contraintes de production, de transport et de stockage. J'étudie notamment la prise en compte de l'efficacité énergétique et des impacts environnementaux, sous divers contrats et diverses structures de coûts et de capacité. J'utilise les outils de la recherche opérationnelle (RO) et de l'optimisation combinatoire pour résoudre ces problèmes d'optimisation d'une manière efficace. Si le LSP constitue le cœur de mes activités de recherche et de mes publications, je travaille également sur les problèmes de Cutting stock & Packing et Fleet sizing. Je collabore actuellement avec des chercheurs en France, aux Etats-Unis, au Portugal, en Tunisie et en Turquie.

LISTE COMPLETE DES PUBLICATIONS

Revue Internationale (SCI)

1. M. Farhat, A. Akbalik, N. Sauer, A. Hadj-Alouane. Lot sizing problem with batch ordering under periodic buyback contract and lost sales, **International Journal of Production Economics (2019)** 208, 500-511.
2. C. Rapine, G. Goisque, A. Akbalik. Energy-aware lot sizing problem: Complexity analysis and exact algorithms. **International Journal of Production Economics (2018)** 203, 254-263.
3. A. Akbalik and C. Rapine. Lot sizing problem with multi-mode replenishment and batch delivery. **Omega (2018)** 81, 123-133.
4. C. Rapine, B. Penz, C. Gicquel, A. Akbalik. Capacity acquisition for the single-item lot sizing problem under energy constraints. **Omega (2018)** 81, 112-122.
5. A. Akbalik, A. Hadj-Alouane, N. Sauer et H. Ghribi. NP-hard and polynomial cases for the single-item lot sizing problem with batch ordering under capacity reservation contract, **European Journal of Operational Research (2017)** 257, 483-493.
6. K. Ertogral, A. Akbalik et S. González. Modelling and analysis of a strategic fleet sizing problem for a furniture distributor, **European J. Industrial Engineering (2017)** 11(1) 49 – 77.
7. A. Akbalik, B. Penz and C. Rapine. Capacitated lot sizing problems with inventory bounds. **Annals of Operations Research (2015)** 229, 1–18.
8. A. Akbalik, B. Penz and C. Rapine. Multi-item uncapacitated lot sizing problem with inventory bounds. **Optimization Letters (2015)** 9(1), 143-154.
9. A. Akbalik and C. Rapine. The single item uncapacitated lot-sizing problem with time-dependent batch sizes : NP-hard and polynomial cases. **European Journal of Operational Research (2013)** 229, 353–363
10. A. Akbalik and C. Rapine. Polynomial time algorithms for the constant capacitated single-item lot sizing problem with stepwise production cost. **Operations Research Letters (2012)** 40, 390-397.
11. A. Akbalik and B. Penz. Comparison of just-in-time and time window delivery policies for a single-item capacitated lot sizing problem. **International Journal of Production Research (2011)** 49(9), 2567-2585.
12. J.H. Tortai, A. Akbalik, S. Soulan, P. Schiavone. Inverse problem solving and optical index determination of resist films by ellipsometry. **Microelectronic Engineering (2010)** 87, 893-898.
13. J.H. Tortai, H. Trouvé, S. Soulan, A. Akbalik. UV impact on the optical properties of thin films of positive tone chemically amplified resist. **Microelectronic Engineering (2009)** 86(4-6), 800-802.
14. A. Akbalik and B. Penz. Exact methods for single-item capacitated lot sizing problem with alternative machines and piece-wise linear production costs. **IJPE (2009)** 119, 367-379.
15. A. Akbalik and Y. Pochet. Valid inequalities for the single-item capacitated lot sizing problem with step-wise costs. **European Journal of Operational Research (2009)** 198, 412-434.
16. A. Akbalik, S. Kebe, B. Penz, N. Sbihi. Exact methods and a heuristic for the optimization of an integrated replenishment-storage planning problem. **Int. Trans. in OR (2008)** 15(2), 195-214.

Conférences Internationales (avec Proceedings)

1. M. Farhat, A. Akbalik, N. Sauer, A. Hadj-Alouane, Inventory replenishment planning with a full truckload cost and a full return policy, 16th IFAC Symposium, INCOM 2018, Bergamo, Italy.
2. M. Farhat, A. Akbalik, N. Sauer, A. Hadj-Alouane, Procurement planning with batch ordering under periodic buyback contract. IFAC-PapersOnLine 2017, 50 (1), 13982-13986, Toulouse, France.
3. A. Akbalik, C. Rapine. Single-item lot sizing problem with carbon emission under the cap-and-trade policy. CoDIT 2014, Metz.
4. J.H. Tortai, A. Akbalik, S. Soulan, P. Schiavone. Inverse problem solving and optical index determination of resist films by ellipsometry. MNE 2009, Micro and Nano Engineering. Gent.
5. A. Akbalik, S. Soulan, J-H Tortai, D. Fuard, I. Kone, J. Hazart, P. Schiavone. An inverse ellipsometric problem for thin film characterization: Comparison of different optimization methods. In Proceedings SPIE 2009. San Jose California, USA.
6. J.H Tortai, H. Trouvé, S. Soulan, A. Akbalik. UV impact on the optical properties of thin films of positive tone chemically amplified resist. MNE 2008, Micro and Nano Engineering. Athens, Greece.
7. A. Akbalik, R. Larbi, B. Penz. Dynamic programming approach for a capacitated lot sizing problem coupled with transportation activities. In Proceedings INCOM 2006, Vol.3, pp.179-184. St Etienne.
8. A. Akbalik, B. Penz. Time window versus just-in-time policy for an integrated supply chain. In Proceedings CIE 2005, pp.31-36, Istanbul, Turkey.
9. A. Akbalik, S. Kebe, B. Penz, N. Sbihi. A global approach to optimize a two-echelon supply chain: Suppliers-Manufacturer. ORPA 2005, Ouagadougou-Burkina Faso.
10. A. Akbalik, V.D. Cung, B. Penz. Optimization in an integrated supply chain: two heuristics and one exact method. In Proceedings IMACS 2005, No. T1-R-00-0653. Paris-France.

Congrès et Workshop Internationaux (sans Proceedings)

1. M. Farhat, A. Akbalik, N. Sauer, A. Hadj-Alouane. Buyback contract terms integrated with batch ordering decisions. IWLS 2019 (International Workshop on Lot Sizing), Paris.
2. C. Rapine, A. Akbalik, C. Gicquel, B. Penz. Renewable versus grid energy for a mid term production and capacity adjustment planning. IWLS 2019 (International Workshop on Lot Sizing), Paris.
3. S. Martins, T. Vasconcelos, A. Akbalik, C. Rapine. Fleet sizing and composition in grocery retailing. VeRoLog 2019 (Workshop of the EURO Working Group on Vehicle Routing and Logistics optimization), Seville, Spain.
4. Céline Gicquel, Ayse Akbalik, Bernard Penz, Christophe Rapine. Production planning with on-site generation of renewable energy. EURO 2019, Dublin, Ireland.
5. A. Akbalik, C. Gicquel, B. Penz and C. Rapine. Lot sizing with capacity adjustment and intermittent renewable energy. PGMO days 2018 (LMH-EDF), Paris Saclay
6. M. Díaz-Madroño, L. Guimarães, B. Almada-Lobo, A. Akbalik, C. Rapine, Leveraging Capacity Planning with Maintenance Insights, IWLS 2018, Itamambuca, Brazil.
7. C. Rapine, B. Penz, C. Gicquel, A. Akbalik. Polynomial time algorithms for the lot-sizing problem under energy constraints. PGMO days 2017 (LMH-EDF), Paris Saclay
8. C. Rapine, G. Goisque, A. Akbalik, Polynomial time algorithms for energy-aware lot sizing problem under stationary energy parameters, IWLS 2017, Glasgow, Scotland
9. C. Rapine, B. Penz, C. Gicquel, A. Akbalik. Lot sizing problem with energy constraints, IWLS 2016, Hannover, Germany.

10. A. Akbalik, A.B. Hadj-Alouane, N. Sauer. Lot sizing problem with stepwise cost under capacity reservation contract, EURO 2015, Glasgow, Scotland.
11. A. Akbalik, C. Rapine. New results on the lot sizing problem with multi-mode replenishment, IWLS 2014 (International Workshop on Lot sizing), Porto.
12. H. Ghribi, A. Akbalik, A.B. Hadj-Alouane, N. Sauer. Single-item capacitated lot sizing problem with capacity reservation contract, IWLS 2013, Bruxelles.
13. Akbalik, C. Rapine. Complexity results for the single item uncapacitated lot-sizing problem with time-dependent batch sizes, IWLS 2012, Rotterdam.
14. A. Akbalik, B. Penz, C. Rapine. Capacitated lot sizing problems with inventory bounds. IWLS 2012, Rotterdam.

Conférences Nationales

1. C. Rapine, J.P. Pedroso et A. Akbalik, Problème de sac à dos 2D avec objets divisibles, ROADEF 2020, Montpellier.
2. C. Rapine, S. Martins et A. Akbalik, Heuristics for multi-commodity capacitated profitable tour problem, ROADEF 2020, Montpellier.
3. C. Gicquel, A. Akbalik, B. Penz, C. Rapine. Planification de production avec deux sources d'énergie, ROADEF 2019, le Havre.
4. M. Farhat, A. Akbalik, N. Sauer, A. Hadj-Alouane. Planification d'approvisionnement sous un contrat buyback périodique avec possibilité de mise au rebut, ROADEF 2018, Lorient.
5. A. Akbalik, C. Rapine. Problème de dimensionnement de lots avec choix des fournisseurs, ROADEF 2018, Lorient.
6. C. Rapine, G. Goisque, A. Akbalik. Dynamic programming algorithms for energy constrained lot sizing problems, ORBEL 2018, Liège, Belgique.
7. M. Farhat, A. Akbalik, A. Hadj-Alouane, N. Sauer. Problème de dimensionnement de lots sous le contrat buyback et production par batch, ROADEF 2017, Metz
8. A. Akbalik, C. Gicquel, B. Penz and C. Rapine Dimensionnement de lots de production sous contrainte d'énergie, ROADEF'2016, Compiègne.
9. H. Ghribi, A. Akbalik, A.B. Hadj-Alouane, N. Sauer. Problème de dimensionnement de lots avec contrat de réservation de capacité. In ROADEF'2014, Bordeaux.
10. A. Akbalik, C. Rapine. Complexité du problème de dimensionnement de lots avec des tailles de batch variables, In ROADEF'2013, Troyes.
11. E. Meric, U. Gokcek, K. Ertogral, A. Akbalik. Dimensionnement de flotte de véhicules et replanification de distribution pour un grand distributeur de meubles en Turquie, In ROADEF'2012, Angers.
12. E. Meric, U. Gokcek, K. Ertogral, A. Akbalik. Bir Distribütör Firma İçin Dağıtım Planlaması ve Araç Sayısı Belirlenmesi, YAEM 2011 (Congrès national de la RO en Turquie)
13. A. Akbalik, B. Penz. Stok kapasite kısıtlı çok ürünlü parti büyüklüğü problemi için çözüm teknikleri ve geçerli kısıt sınıfları, YAEM 2011 (Congrès national de la RO en Turquie)
14. A. Akbalik, J.H. Tortai, P. Schiavone. Vérification de l'exactitude des indices optiques des couches minces optimisées : relations de Kramers-Kronig, In ROADEF'2010, Toulouse.
15. A. Akbalik, Y. Pochet. Inégalités valides pour le problème de dimensionnement de lots avec des coûts de production par palier. In ROADEF'08, Clermont-Ferrand, France.
16. A. Akbalik, B. Penz. Comparison of sequential and simultaneous optimization to planify integrated supply chain activities: dynamic programming-based heuristics. In ORBEL 2007, Luxembourg. (Conférence qui réunit la communauté de RO Belge)

17. A. Akbalik, Dynamic programming algorithms and MIP reformulations for production-transportation planning problems, Mathematical Programming, Han-sur-Lesse, Belgique, 2007
18. A. Akbalik, S. Kebe, B. Penz, N. Sbihi. Two dynamic programming formulations in the extension of the simultaneous optimization of an inbound supply chain. In Proceedings MOSIM 2006, Rabat, Maroc.
19. A. Akbalik, V.D. Cung, B. Penz. Optimisation conjointe des activités de production, de transport et de stockage dans une chaîne logistique. In GDR MACS - JDMACS-JNMACS 2005, Lyon.
20. A. Akbalik, V.D. Cung, B. Penz. Un algorithme de programmation dynamique pour l'optimisation d'une chaîne logistique production-transport-stockage. ROADEF 2005, Tours, France.

Séminaires Invités

1. **Séminaire au DEGI Club (Industrial Engineering & Management Department) de l'université de Porto, Juin 2019**, « Fleet Sizing and Composition in Grocery Retailing », par Tiago Vasconcelos supervisé par Sara Martins, Christophe Rapine et Ayse Akbalik, Master of Science Computer Science.
2. **Industrial Engineering Department (FEUP), University of Porto, April 2018**, « Polynomial time algorithms and complexity results for energy-aware lot sizing problem »
3. **DEGI Club (Industrial Engineering & Management Department) University of Porto, May 2018**, « Lot sizing problem under capacity reservation contract »
4. **Lot sizing day P2LS 2018, Paris** (Planification de la Production et Lot-Sizing), GDR-RO "Planification de production et économie circulaire" and "Coordination des décisions de planification".
5. **Lot sizing day P2LS 2017, Paris** (Planification de la Production et Lot-Sizing) GDR-RO « Planification de production et gestion d'énergie » LIP6, UPMC, Paris, Polynomial time algorithms and complexity results for energy-aware lot sizing problems.
6. **Laboratory LCOMS (Université de Lorraine), Metz, July 2016**. Lot sizing, dynamic programming, integer programming, inverse problems.
7. **Lot sizing day P2LS 2015, Paris** (Planification de la Production et Lot-Sizing) GDR-RO "Sustainable production planning" (June 2015), LIP6, UPMC, Paris
8. New valid inequalities for the lot sizing problem, **TOBB University of Economics and Technology, Ankara, Turkey, Feb 2010**.
Inverse problem solving and Kramers-Kronig Transformation, **LTM, CNRS, Grenoble, 2009**.
9. An inverse problem in nanotechnologies: a regularization technique and valid inequalities for a capacitated lot sizing problem. Séminaire, **G-SCOP, Grenoble. June 2008**.
10. My research activities, different fundings and organisms in Europe **Middle East Technical University (METU, Ankara, Turkey)**, Industrial Engineering and Applied Mathematics Department. **May 2008**
11. Différentes méthodes pour résoudre le problème de dimensionnement de lots / Présentation des laboratoires de recherche en RO en France. **TOBB, Ekonomi ve Teknoloji Universitesi (Ankara, Turkey)**, Industrial Engineering Department. **May 2008**.
12. Problème de régularisation en nano-technologie / Des inégalités valides pour le problème de dimensionnement de lots. **Bilkent University (Ankara, Turkey). May 2008**.
13. Introduction Recherche Opérationnelle/Optimisation Combinatoire, présentation de certaines techniques de résolution. Pour les chercheurs à **LTM (CNRS), Grenoble. Dec 2007**.
14. Des algorithmes polynomiaux pour le problème de dimensionnement de lots. **Ulg (Université de Liège), Belgique. Mar 2007**.
15. Ma problématique de recherche sur la gestion des chaînes logistiques. **CREGI, FUCaM, Mons, Belgique. Mar 2007**.
16. Algorithmes de programmation dynamique et reformulations en PLNE pour les problèmes de planification production-transport. Groupe de l'optimisation du transport - Cluster GOSPI. **Université**

de Savoie, Annecy. 2007.

17. Logistic optimization for supply chain management : extensions of the lot sizing problem. Mathematical Programming seminar, **CORE, UCL, Belgique. Oct 2006.**
18. Problème de dimensionnement de lots, introduction au logiciel Mosel pour résoudre les PLNE associés. **Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Maroc. 2006.**
19. Introduction à la logistique. **Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Maroc. 2005.**
20. Optimisation des flux physiques d'une chaîne logistique : interaction production-stockage-transport. **Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Maroc. Oct 2004.**
21. Inter-organizational issues in Supply Chain Management, Molde University College, **Norvège, Dec 2004.**

Autres publications

1. A. Akbalik. Günlük hayatımızda matematik ve biz: Yöneylem uygulamaları. *epiSTEM Türkiye*, May 2019. Short communication in Turkish on "Operations Research Applications in our everyday life".
2. A. Akbalik and B. Penz. (2007) Exact methods for single-item multi-plant capacitated lot sizing problem coupled with transportation. CORE Discussion Paper. No.2007/49.
3. A. Akbalik and Y. Pochet. (2007) Valid inequalities for the single-item capacitated lot sizing problem with step-wise costs. CORE Discussion Paper. No.2007/87.

Liste des encadrements

ENCADREMENTS DE THESE DE DOCTORAT

- **Co-encadrement de thèse de Mlouka Farhat** (33% d'encadrement, avec N. Sauer (Université de Lorraine) et A. Hadj-Alouane (ENIT, Tunis))
 - Intitulé : Problème de dimensionnement de lots avec contrat buyback et production par batch
 - Co-tutelle avec l'OASIS-ENIT de Tunisie. Financement : LGIPM & Projet CMCU - OASIS
 - Date de début : 1e Octobre 2015
 - Date de soutenance : 8 Février 2019 (retard de 3 mois dû au congé de maternité de Mme Farhat)
 - **Résultats :**
 - Deux articles revues acceptés : Farhat *et al.* IJPE (2019) et short abstract of PhD thesis in Farhat, 4OR (2019).
 - Deux conférences internationales : IFAC 2017, IFAC 2018.
 - Un workshop international IWLS 2019, Paris.
 - Deux conférences nationales : RoadeF 2017, RoadeF 2018.
 - Soumissions et articles en cours : Un 3^e article soumis en janvier 2019, en révision. 4^e et 5^e article en cours de préparation.

- **Co-encadrement de thèse de Houcem Ghribi (abandonné au bout d'un an)** (33% d'encadrement, avec N. Sauer (UL) et A. Hadj-Alouane (ENIT))
 - Intitulé : Problème de dimensionnement de lots avec contrat de réservation de capacité
 - Co-tutelle avec l'OASIS-ENIT de Tunisie. Financement : LGIPM & OASIS
 - Date de début : octobre 2013, Fin : août 2014 (avec une période de recherche bibliographique entre 03/2013-08/2013)
 - *M. Ghribi a décidé d'abandonner sa thèse au bout d'un an pour des raisons personnelles*
 - **Résultats :**
 - Un article revue : Akbalik *et al.* EJOR (2017).
 - Une conférence nationale : Roadef 2014.
 - Workshop internationale de lot sizing : IWLS 2013.

ENCADREMENTS DE MASTER 2 RECHERCHE

- **Co-encadrement de Tiago Vasconcelos** avec S. Martins (University of Porto) et C. Rapine (Univ Lorraine). « Algorithm design for the fleet sizing problem in grocery retail distribution », 01/01/2019 – 30/06/2019.
Résultats : Une conference-workshop VeRoLog - Workshop of the EURO Working Group on Vehicle Routing and Logistics optimization, 2019. Un séminaire DEGI Club, University of Porto, Juin 2019.
- **Co-encadrement (50%) de Silvia Gonzalez** (02/2015-06/2015) avec K. Ertogral de TOBB ETU, Ankara-Turquie, dans le cadre d'un échange Erasmus+. "Analysis of the strategic fleet sizing problem under seasonal demand". J'ai aidé Silvia à trouver un financement Erasmus pour couvrir ses frais lors de son séjour en Turquie. Silvia a effectué la partie expérimentale de notre projet, mené depuis 2011.
Résultats : Article revue Ertogral *et al.* (2017)
- **Co-encadrement (50%) de Salma Mouatassim** avec N. Sauer (02/2015-06/2015).
 "Optimisation de différentes extensions du problème de dimensionnement de lots sous le contrat de réservation de capacité"
- **Co-encadrement de Houcem Ghribi** (10/2012-08/2013) avec Nathalie Sauer de l'Université de Lorraine, France et Atidel Hadj-Alouane de l'ENIT, Tunisie. "Problème de dimensionnement de lots avec contrat de réservation de capacité".
Résultats : Présentation lors du workshop international IWLS 2013.
- **Co-encadrement (50%) de Alina Ghita** avec N. Sauer (Univ Lorraine) (02/2012-06/2012).
 « Problème intégré de dimensionnement de lots et de flottes de véhicules ». Collaboration avec l'Université de Pitesti, Romania.
- **Co-encadrement (50%) d'Amal Gouiaa** avec Christophe Rapine sur le « Problème de dimensionnement de lots avec la prise en compte de l'empreinte carbone » (02/2012-07/2012)
- **Co-encadrement (50%) de Rim Larbi** (2004-05), avec Bernard Penz de Grenoble INP, ENSGI. Sujet intitulé « Optimisation de la gestion d'une chaîne logistique : production-stockage-distribution ». **Résultats :** Conférence internationale INCOM 2006.

AUTRES ENCADREMENTS

- J'ai encadré plusieurs stages industriels en M1 et M2-professionnel qui se sont déroulés dans des entreprises en France ou à l'étranger.

- J'ai encadré des projets de recherche en M1 et M2 sur les problématiques de dimensionnement de lot, des ERP, de la gestion des stocks et de la prise en compte environnemental dans la gestion des chaînes logistiques.
- J'ai encadré une étudiante Turque (O.N. Attila) de 4e année à TOBB-ETU, dans le cadre d'un échange Erasmus qu'elle a effectué à l'UL, projet de fin d'études 09/2014-12/2014. A la suite de son sujet de recherche que nous avons encadré Christophe Rapine et moi sur le LSP avec empreinte carbone, Oyku a été acceptée en doctorat à University of Strathclyde, Glasgow et travaille sur le problème de LSP robuste sous la direction de Kerem Akartunali.
- J'ai supervisé plusieurs projets en Licence Professionnel.
- J'ai supervisé un VAE (validation des acquis de l'expérience) de M. AUSWEGER Alain. La soutenance a eu lieu en Février 2013.
- J'ai encadré trois PFE industriels de 8 mois chacun à TOBB ETU, Ankara (2010-11). Chaque groupe de PFE était composé de 5 étudiants qui travaillaient les 4 mois complets dans une entreprise sur un problème concret en génie industriel. Voici quelques détails sur le contenu de chaque projet :
 - **Projet chez Türk Traktör** : Optimisation des flux de matières premières et des produits semi-finis entre le dépôt central et les 6 lignes de production, amélioration de la logistique interne. Cette équipe d'étudiants que j'ai encadrés avec une autre collègue était parmi les finalistes du Challenge RO Turque (équivalent à Challenge ROADEF).
 - **Projet chez Aygersan** : Conception d'un atelier de production de phares, repositionnement des machines lourdes pour améliorer les flux de produits
 - **Projet Yön Pazarlama** : Optimisation du stockage et du transport chez un grand distributeur de meubles, réorganisation des niveaux de stockage de chaque point de vente associé à Yön Pazarlama.

Participation aux jurys

- **Membre du jury du Prix Master pour la Roadef 2020, Montpellier**
- **Membre du jury du meilleur article étudiant** de la ROADEF 2018, Lorient.
- **Jurys de VAE** : Membre de jury de 2 VAE soutenus en génie industriel, 2013
- **Membre du jury de Master 1** : Stage industriel & projet de recherche (tous les ans)
- **Master 2** : Stage industriel en GI-Université de Lorraine (tous les ans)
- **Master 2 recherche** : Membre du jury en 2012-13-14-15-16
- **Licence professionnelle COSLI** : Membre du jury de stage industriel (tous les ans, sauf les deux dernières où j'étais en déplacement à l'étranger pour un séjours de recherche)
- **Membre du jury de PFE de 3^e année d'ingénieurs** : Ecole des Mines de Nancy
- **Membre du jury PFE à TOBB ETU** pour les dernières années d'ingénieurs

Projets, financements, bourses, distinctions

Porteur du projet EPOC, Financement « Labex Mathématique Hadamard-LMH » (2019-20) (renouvellement du projet en cours pour une année)

Porteur du projet : Ayse Akbalik

Membres du projet : Céline Gicquel (LRI, Université Paris Sud), Christophe Rapine (UL), Bernard Penz (Univ. Grenoble Alpes, G-SCOP CNRS).

Intitulé du projet : Efficacité Énergétique en Planification de Production : Modèles Algorithmiques et Optimisation Combinatoire

Membre du projet EPOC, Financement « Labex Mathématique Hadamard-LMH » (2017-19)

Porteur du projet : Bernard Penz (Univ. Grenoble Alpes)

Membres du projet : Ayse Akbalik (LCOMS, UL), Céline Gicquel (LRI, Université Paris Sud), Christophe Rapine (UL).

Intitulé du projet : Efficacité Énergétique en Planification de Production : Modèles Algorithmiques et Optimisation Combinatoire

Porteur du projet Région Lorraine ABC² (2015-2016)

Membres du projet : Céline Gicquel (LRI, Université Paris Sud), Bernard Penz (Univ. Grenoble Alpes), Christophe Rapine (UL).

Intitulé du projet : “Problème de dimensionnement de lots sous contraintes énergétiques et environnementales”.

Porteur, avec Christophe Rapine, du projet Région Lorraine “ABERS” (2012-2014)

Membres du projet : Esra Buyuktahtakin (Wichita State University), Kadir Ertogral (TOBB ETU, Ankara), Nathalie Sauer (UL).

Intitulé du projet : “Optimisation couplée du dimensionnement de flottes de véhicules et de lots d'approvisionnement pour la logistique”.

LTM (CEA, CNRS) 6 mois projet (2008-09)

Financement de 6 mois de projet pour mener le projet en ellipsométrie au Laboratoire LTM (Laboratoire des Technologies de la Microélectronique) au CEA, CNRS, Minatec.

CORE fellowship (2006-07)

Bourse de post-doc très sélective, donnée sur une année pour financer un projet dans l'équipe Mathematical Programming de CORE, un centre de recherche d'excellence en étude polyédrale, équipe de Y. Pochet & L.A. Wolsey.

Allocation MENR pour effectuer un doctorat, INP Grenoble, Laboratoire G-SCOP (2003-06)

Financement par une allocation du Ministère d'Enseignement National et de la Recherche

Bourse d'excellence EIFFEL pour financer mon DEA en Génie Industriel à l'ENSGI, INP Grenoble (2002-03)

Financement par une bourse d'excellence du gouvernement Français. Sélection par dossier, puis présentation devant un jury international, réalisé à l'université Galatasaray, Istanbul.

Mes activités de recherche avant mon affectation à l'université de Lorraine

Voici un petit résumé de mes activités de recherche avant que je sois recrutée en tant que MCF à l'UL.

Thèse de doctorat au Laboratoire GILCO (nouveau G-SCOP, CNRS), Grenoble INP (2003-2006)

Optimisation de problèmes de planification de production, intégrée avec le stockage et le transport. Proposition de méthodes de résolution exactes et approchées pour planifier ces activités en un temps raisonnable, avec la détermination de la complexité des problèmes associés. Utilisation des outils de la recherche opérationnelle. Utilisation des logiciels d'optimisation (solveurs linéaires, langages de modélisation). Codage des modèles mathématiques et comparaison de la performance des méthodes.

4 publications revues : IJPE, OR Letters, ITOR, IJPR. Plusieurs communications dans des conférences nationales et internationales.

Post-Doc à Center of OR and Econometrics – CORE, Univ. Catholique de Louvain (2006-2007)

Proposition de reformulations mathématiques et de nouvelles inégalités valides pour résoudre plus efficacement les programmes linéaires en nombres entiers (PLNE) pour les problèmes de dimensionnement de lots. Etude de l'approche polyédrale. Nombreux séminaires dans les universités en Belgique (voir Séminaires). Publication des travaux dans la revue internationale EJOR. Plusieurs communications dans des conférences nationales et internationales.

Projet au Laboratoire des Technologies de la Microélectronique (LTM), CEA, CNRS (2007-2009)

Projet réalisé au sein de l'équipe de lithographie composée de physiciens et d'électroniciens. Problème d'optimisation des mesures optiques par la résolution d'un problème inverse, non-linéaire. Calcul des indices optiques et de l'épaisseur des couches minces déposées sur des substrats pour fabriquer des circuits intégrés. Outil informatique codé en Matlab, en cours d'utilisation au LTM. Deux publications dans la revue international Microelectronic Engineering et une communication dans une conférence internationale.

Activités de valorisation et de transfert, rayonnement scientifique

- **Attribution d'un semestre CRCT entre Février 2019 – Juillet 2019 par le CNU**
- **Séjour de recherche et de collaboration de 4 mois à l'Université de Porto, à FEUP (faculté d'ingénierie), Mars-Juillet 2019 :**
 - **Projet "Integrated lot sizing problem with machine replacement activities"** avec Bernardo Almada-Lobo, Luis Guimaraes et Christophe Rapine.
 - **Projet "Semi-Fluid Packing"** avec Joao Pedro Pedroso et Christophe Rapine
 - **Projet « Fleet Sizing and VRP-TW with multi compartment vehicles »** avec Sara Martin (chercheuse Post-Doctorante à l'Université de Porto), Tiago Vasconcelos (étudiant en Master 2 – Informatique) et Christophe Rapine
 - **Projet "Integrated Cutting Stock - Lot sizing problem"** avec José Fernando Oliveira, Maria Antonia Carravilla, Elsa Silva et Christophe Rapine
- **epiSTEM, Turkiye (<https://epistemturkiye.org/>) :** J'ai commencé à travailler bénévolement dans cette structure d'échange et de diffusion de la science aux plus jeunes en Turquie en **2019**. Très actif avec ses 30 membres, tous universitaires Turcs travaillant à l'étranger dans le domaine des « **Science, Technologie, Ingénierie et Mathématiques (STEM)** », son objectif est de diffuser la science et les nouveautés scientifiques en les vulgarisant au mieux. Je rédige et j'édite des articles scientifiques en langue Turque. Voir le lien suivant pour un article récent que j'ai rédigé sur les applications de la recherche opérationnelle dans notre vie de tous les jours, <https://epistemturkiye.org/gunluk-hayatimizda-matematik-ve-biz-yoneylem-uygulamalari/> . Je vais encadrer des groupes de lycéens autour d'un projet scientifique. Je serai une des responsables du projet « Veux-tu coder avec moi ? » pour apprendre à coder dans différents langages aux enfants de l'école primaire et aux collégiens. Réunions effectuées les week-ends, dans la soirée et travail de rédaction des articles effectué dans la nuit (sans aucun but lucratif).
- **Membre du comité scientifique du congrès Roadef 2019, le Havre.**
- **Séjour de recherche de 3 mois à l'université de Porto (Avril-Mai-Juin 2018) :** Chercheuse invitée dans l'équipe de Prof. Bernardo Almada-Lobo. Plusieurs collaborations lancées avec d'autres chercheurs.
 - **Projet "Lot sizing problem with machine replacement and revision activities"** avec Bernardo Almada-Lobo, Luis Guimaraes et Christophe Rapine
 - **Projet Semi-Fluid Packing** avec Joao Pedro Pedroso et Christophe Rapine
 - **Projet Fleet Sizing and VRP-TW avec des véhicules à multi-compartiments** avec Sara Martin (chercheuse Post-Doctorante à l'Université de Porto) et Christophe Rapine
 - **Projet Robust Lot sizing problem** avec Agostinho Agra et Christophe Rapine
- **Co-présidente du comité d'organisation du congrès ROADEF 2017 Metz (22-24 février 2017),** avec 380 participants. Voici le lien: <http://roadef2017.event.univ-lorraine.fr/>
Cet événement représente la plus grande manifestation nationale dans le domaine de la Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision en France. Le congrès Roadef édition Metz a beaucoup été

apprécié par les participants de tous les points de vue. Nous avons eu énormément de retours positifs tant sur le plan scientifique que sur le plan organisationnel.

- **Montage d'un projet avec Temel Oncan (Université de Galatasaray, Istanbul)** : J'ai invité le professeur Oncan au LGIPM pendant 1 mois (Septembre 2015). Nous avons collaboré autour d'un problème de graphe (Minimum branch vertex spanning tree problem). Nous continuons cette collaboration. <http://sbe.gsu.edu.tr/temel-oncan/>
- **Montage d'un projet avec Kadir Ertogral (TOBB ETU, Ankara)** : J'ai invité M. Ertogral dans le cadre de l'accord **Erasmus** pour une semaine (Juin 2013). M. Ertogral a donné des séminaires autour de la logistique, du problème de gestion des stocks et des contrats. Projet "dimensionnement de flottes de véhicules pour une firme de logistique Turquie". <http://kertogral.etu.edu.tr/>
- **Arbitrage pour des conférences** : MOSIM, IFAC, ROADEF.
- **Responsable « Erasmus » pour les relations avec les universités Turques.**
- **Cours de Master 2 recherche (voir Tableau 1)** :
 - Module en Master 2 CII-KIMP à l'ENSAM (formation conjointe aux étudiants de l'ENSAM, de l'ENIM et de l'UL), "Gestion de production" :
 - Module optionnel en Master 2 recherche de l'UL, "Système d'aide à la décision" (PL, dualité, PLNE, B&B, inégalités valides, Xpress, avec des exemples sur mes thématiques de recherche sur les problèmes de dimensionnement de lot)
 - Module effectué dans le cadre de la convention avec l'EMSI-Casablanca, "Outils d'aide à la décision" (même contenu que le module Système d'aide à la décision ci-dessus)

Arbitrage régulier pour des revues internationales

- ✓ International Journal of Production Economics (IJPE)
- ✓ European Journal of Operational Research (EJOR)
- ✓ Journal of the Operational Research Society (JORS)
- ✓ Production and Operations Management (POM)
- ✓ RAIRO-OR
- ✓ Computational Optimization and Applications (COA)
- ✓ International Journal of Production Research (IJPR)
- ✓ Journal of Cleaner Production
- ✓ IIE Transactions
- ✓ OR Spectrum
- ✓ Computers and Operations Research (COR)
- ✓ International Transactions in Operational Research (ITOR)
- ✓ American Journal of Operations Research (AJOR)
- ✓ European Journal of Industrial Engineering (EJIE)

Partie I.3

Activités d'enseignements

Mes activités d'enseignement s'articulent autour de la Recherche Opérationnelle, des outils d'optimisation et de la Gestion de la Production, s'inscrivant ainsi en continuité de mes activités de recherche. J'enseigne dans différents établissements et à différents niveaux de formation (L3, M1, M2, Licence Professionnel). J'alimente mes cours avec mes compétences acquises en recherche et les résultats significatives obtenus lors de mes travaux. Ainsi je réalise le transfert de mes activités de recherche, via les étudiants, vers le monde industriel.

Les établissements où j'ai enseigné depuis 2004 :

- Grenoble INP – ENSGI, France (2004-06, 2007-08)
- Polytech'Grenoble, Université Joseph Fourier, France (2007-08)
- TOBB ETU-Ankara, Turquie (2010-11)
- Ecole des Mines de Nancy, France (depuis 2011)
- ENSAM-Campus de Metz, France (depuis 2011)
- EMSI-Casablanca, Maroc (une semaine bloquée 2015-16)
- IULT Wroclaw, Pologne (deux semaines bloquées, 2014, 2015)
- Je suis officiellement rattachée à l'UFR-MIM (UFR Mathématiques-Informatique-Mécanique) de l'université de Lorraine depuis 2011

Dans les domaines suivants :

- Recherche opérationnelle
- Outils d'aide à la décision
- Gestion de la production
- Gestion des chaînes logistiques
- Conception et modélisation des systèmes industriels
- Outils et logiciels pour optimisation et simulation des systèmes
- Simulation sur Arena
- Contrôle Qualité

Dans différentes formations aux niveaux :

- Licence Professionnel
- Licence 3
- Master 1
- Master 2
- 3^e année d'ingénieur

Ma pédagogie d'enseignement :

Depuis 2004, qui marque le début de mes activités d'enseignement, j'ai monté plusieurs cours dans différents niveaux, certaines fois s'inscrivant dans mes thématiques, mais parfois étant complètement dans d'autres domaines que je ne connaissais pas auparavant. Pour chaque cours j'ai préparé des polycopiés, j'ai trouvé des vidéos intéressantes pour les étudiants, j'ai monté des TD-TP originaux, ce qui m'a demandé énormément de temps et d'énergie. Chaque année je mets à jour mes polycopiés pour y intégrer des nouveautés, et pour adapter mes cours aux nouveaux publics. La pédagogie que j'utilise est très appréciée par les étudiants. J'y introduis des exemples de la vie réelle, du terrain industriel pour préparer les étudiants à leur future carrière. J'utilise également mes travaux de recherche afin de faire la transition de la théorie vers la pratique. Pour chaque nouveau concept, j'essaie de leur montrer des vidéos courtes et des logiciels applicatifs pour faire le lien avec la pratique. J'adapte le niveau de mes cours en fonction du niveau et du bagage théorique des étudiants. Je les évalue sur plusieurs séances de TP, je distribue des points bonus récompensant la participation active au cours pour éviter un échec dû à l'évaluation finale. Je donne

également plusieurs lectures de cas d'étude que les étudiants présentent devant leurs camarades, ce qui leur permet d'apprendre mieux en classe inversée. Plusieurs de ces lectures sont en Anglais, ce qui leur permet de prendre conscience de la nécessité d'avoir un bon niveau d'Anglais pour leur future vie professionnelle. Pour cette raison, la plupart de mes slides sont aussi en Anglais et je leur montre les concepts importants en GI et en RO dans les deux langues. Voici la liste des différents modules que j'ai enseignés depuis le début de ma titularisation à l'Université de Lorraine (2011). Vous trouverez les détails des modules enseignés avant ma titularisation plus loin dans ce chapitre.

2011-2019

| Intitulé du module | Volume annuel | Niveau, établissement |
|--|---------------|------------------------------------|
| Gestion de Production | 12h | M2 CII-KIMP, ENSAM |
| Outils d'aide à la décision | 20h | M2, Casablanca, EMSI (1 fois) |
| Systèmes d'Aide à la Décision | 18h | M2 GSI, UL |
| Gestion des Chaines Logistiques | 21h | 3A, GI, Ecole des Mines de Nancy |
| Méthodes Stochastiques de Gestion de Production | 18h | 3A, MGP, Ecole des Mines de Nancy |
| Organisation Industrielle et Logistique | 30h | M1 GSI, UL |
| Conception des systèmes de production | 30h | M1 GSI, UL |
| Assurance Qualité et ISO 9001 | 48h | M1 GSI, UL (2011-14) |
| Concepts of Management (Anglais) | 18h | M1, Pologne, IULT Wroclaw (2 ans) |
| Recherche Opérationnelle | 30h | L3, SPI-GI, UL |
| Modélisation des systèmes industriels | 30h | L3, SPI-GI, UL |
| Logiciel de simulation ARENA | 16h | Licence Professionnelle, COSLI, UL |
| Outils pour dimensionnement des chaînes logistiques | 18h | Licence Professionnelle, COSLI, UL |
| Outils pour la conception des Système de Production | 30h | Licence Professionnelle, COSLI, UL |

Tableau 1. Liste des cours effectués entre 2011-2019, après ma titularisation à l'Univ Lorraine.

DETAILS SUR UN MODULE SELECTIONNE

Système d'aide à la décision (M2, Univ. Lorraine)

Dans ce module j'introduis différents outils d'aide à la décision issus de la recherche opérationnelle aux étudiants qui ont déjà un certain niveau en recherche opérationnelle et en modélisation mathématique. Ce module aborde aussi bien l'étape de modélisation que les méthodes efficaces de résolution, notamment face à des problèmes de grande taille. Le cours est illustré par des exemples en gestion de la chaîne logistique (gestion de production, problème de transport, chaîne logistique à multi-échelons, génération d'électricité, planification des approvisionnements, les problèmes classiques de la RO, etc.) et leur résolution en pratique via des logiciels commerciaux. Comme ce cours est optionnel, les étudiants choisissant ce module ont un bon niveau, ce qui permet d'approfondir des concepts avancés en RO.

Voici quelques titres de mes séances :

- ✓ Rappel de Programmation Linéaire (PL)
- ✓ Simplexe, Dualité, Analyse de sensibilité
- ✓ Programmation linéaire en nombres entiers (PLNE)
 - Modélisation des modèles classiques cités ci-dessus
 - Résolution (Relaxation linéaire, Branch & Bound)
 - Implémentation sur un solveur linéaire (Excel Solveur, Xpress IVE)
- ✓ Techniques de linéarisation (des expressions non-linéaires)
- ✓ Inégalités valides (facettes, enveloppe convexe, propriétés des polyèdres)
- ✓ Branch & Cut, Cutting plane
- ✓ Démonstration sur Xpress IVE, visualisation de l'arbre de branchement

Réalisations particulières :

- Préparation de centaines de slides pour le montage de ce module.
- Montage des énoncés de TD et de TP, adaptation aux niveaux des étudiants tous les ans
- Lecture du Livre Blanc de la Recherche Opérationnelle par les étudiants, discussion de certains cas d'études
- Réflexion avec les étudiants des modèles mathématiques des problèmes connus avec des applications réelles associées
- Implémentation des modèles de PLNE sur Xpress IVE
- Implémentation des modèles simples sur Excel Solveur

APERCU DES ENSEIGNEMENTS EFFECTUES AVANT L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Ci-dessous je donne une synthèse des enseignements et des encadrements que j'ai effectués avant d'être nommée maîtresse de conférences à l'Université de Lorraine. La période concernée recouvre les années 2003 à 2011.

2010-2011

J'ai enseigné le module « **Work analysis and design** » aux étudiants de 3^e année d'ingénieur en Génie industriel à TOBB ETÜ. J'ai préparé plusieurs slides, des exercices, des projets sur les concepts importants de la conception et étude de travail. J'ai monté un nouveau module pour les étudiants de master de recherche intitulé « **Integer Programming** », sur les techniques avancées de la programmation en nombres entiers. J'ai assuré ces enseignements **en Anglais**. J'étais l'unique responsable de ce dernier module qui représentait un volume de 42h (théorique et pratique). Les étudiants ont effectué des projets de modélisation d'un système de production en PLNE, l'ont implémenté sous Xpress IVE, ils ont proposé des inégalités valides et les ont intégrées dans leur formulation sous forme d'algorithme de séparation au sein d'un Branch & Cut. J'ai eu un retour très positif des étudiants et j'ai obtenu une note de 4.25/5 sur l'évaluation par 72 étudiants sur plusieurs critères. J'ai été félicité par la direction de l'école.

| Intitulé du cours | Volume horaire | Etablissement |
|--------------------------|----------------|----------------------------|
| Work analysis and design | 126h CM | TOBB ETÜ, Génie Industriel |
| Integer Programming | 42h CM | TOBB ETÜ, Génie Industriel |

2009

En **2009**, j'ai effectué les TD et les TP du module de la RO (**24h**) dans la filière 3I3, à Polytech'Grenoble.

| Intitulé du cours | Volume horaire | Etablissement |
|--------------------------|----------------|-------------------------------------|
| Recherche Opérationnelle | 16h TD+8h TP | Polytech'Grenoble, UJF, filière 3I3 |

2007-2008

Pendant mon année de demi-ATER à Polytech'Grenoble j'ai effectué les modules ci-dessous (98h).

| Intitulé du cours | Volume horaire | Etablissement |
|---------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| Recherche Opérationnelle | 20h TD + 4h30 cours | Polytech'Grenoble, UJF, filière RICM |
| Coordination des flux physiques | 9h cours | ENSGI, INPG |
| Recherche Opérationnelle | 16h TD+8h TP | Polytech'Grenoble, UJF, filière 313 |
| Traitement du Signal | 40h TP | Polytech'Grenoble, UJF |

2003-2006

Pendant ma thèse de doctorat (2003-2006), j'ai effectué environ **215h** d'enseignements. Le tableau ci-dessous donne une synthèse des enseignements et encadrements effectués.

| Intitulé du cours | Volume horaire | Etablissement |
|--|-----------------------|--------------------|
| Projet Informatique (Java) | 42h TP | ENSGI – INPG |
| Optimisation en Gestion de Production | 12h TD (2 ans) | ENSGI – INPG |
| Projet en Optim. Gestion de Production | 16h TD (3 ans) | ENSGI – INPG |
| RO - Ordonnancement d'un Projet | 16h TP+ 6h TD (2 ans) | Polytech' Grenoble |
| RO - OPL Studio | 6h TP | ENSGI – INPG |
| Gestion de production | 15h TD (2 ans) | ENSGI – INPG |
| ADONIX, logiciel des ERP | 24h TP | ENSGI – INPG |

AUTRES ACTIVITES ET RESPONSABILITES (PEDAGOGIQUES, ADMINISTRATIVES)

- (Depuis 2019) : J'ai commencé à travailler dans une structure d'échange et de diffusion de la science aux plus jeunes : **epiSTEM, Turkiye** (<https://epistemturkiye.org/>). Cet organisme a été créé en 2017 par une jeune chercheuse Turque, qui fait actuellement son post-doc à Stanford University. Actuellement epiSTEM est constitué de 30 membres actifs, tous chercheurs Turcs dans des universités à l'étranger (Yale, Oxford, Cambridge, Stanford, Boston, California, Basel, Lausanne, New York, British Columbia, Zurich, Max Planck-Allemagne, Louvain, Porto, Catalonia, etc.). L'objectif est de divulguer la science et les nouveautés scientifiques à destination de la jeunesse en les vulgarisant pour atteindre différents niveaux de la population en Turquie. Les différentes activités conduites par epiSTEM comportent :
 - Rédaction d'articles courts pour introduire une avancé scientifique ou un domaine mal connu – compréhensibles par le plus grand nombre, sans être spécialiste du domaine
 - « Veux-tu faire une expérience avec moi ? » Un projet qui réunit jeunes lycéens et chercheurs à l'étranger afin d'effectuer un projet commun proche de la spécialité de l'encadrant. Ceci permet aux plus jeunes de connaître les joies et les difficultés des projets de recherche et leur ouvre la porte des établissements à l'étranger. Dans le cadre de ce projet, depuis le début août 2019, je co-supervise un groupe de lycéens scolarisés en Turquie sur un projet de développement d'un mini-logiciel qui permettra d'identifier les arrêts cardiaques en utilisant des détecteurs de pulsations cardiaques et les smart-phones. Ce système permettra d'avertir les proches du patient et pourra passer en contact avec les systèmes informatiques des ambulances. C'est un projet mené avec Melike Donertas, chercheuse à European Bioinformatics Institute, Cambridge. Nos réunions hebdomadaires sont effectuées tous les dimanches, en plus des réunions surprises dans la semaine.
 - Projet de codage : Apprendre à coder à travers des jeux, des exemples amusants, des conférences visio et des échanges à distance.
- (2014-16) : Responsable de la **conception du site web** du Laboratoire LGIPM avec Christel Wiemert. Cette responsabilité m'a demandé beaucoup de temps : j'ai suivi des formations du service numérique de l'université de Lorraine, j'ai créé un espace dédié au LGIPM sur HAL pour stocker les publications des membres, nous avons réalisé avec Mme Wiemert plusieurs dizaines d'heures de travail afin d'avoir un site web fonctionnel, en collaboration avec le service du numérique de l'UL. Nous avons effectué, avec C. Wiemert, 2 séances de quelques heures de **formation aux membres du LGIPM sur l'utilisation du nouveau site web** et de l'espace d'archivage HAL pour le traitement des publications. Voir le site web ainsi créé : <http://lgipm.univ-lorraine.fr/>
- (2012-13) : J'ai donné une **suite de séminaires sur Xpress IVE** et modélisation linéaire en nombres entiers pour certains membres et doctorants du Laboratoire LGIPM.
- (Depuis 2012) : Je suis **responsable Erasmus des échanges avec les universités en Turquie**. Cependant, suite aux événements survenus en Turquie, ces échanges ont été arrêtés pour une certaine période. J'ai tout de même continué à aider les chercheurs qui étaient dans des situations difficiles (politiquement) à monter leur dossier et à leur trouver des bourses ou du travail en Europe, dans divers établissements. Ces démarches m'ont demandé énormément de temps et d'énergie, souvent effectués pendant les nuits.

PARTIE II

Bilan de recherche

Problème de dimensionnement de lots avec limitation de ressources

Problème de dimensionnement de lots avec différents modes d'approvisionnement

Dimensionnement de flottes de véhicules et tournées de véhicules

Bilan des activités de recherche

Je mène mes activités de recherche autour des thématiques de la planification de production, de la gestion de stock et du transport. Ces différentes thématiques pourraient être regroupées sous le vocable de la gestion des chaînes logistiques, mais le terme me semble trop ambitieux et général. Je préfère rester plus spécifique en les désignant comme des variantes du problème de dimensionnement de lots' (Lot Sizing Problem en Anglais, LSP). J'étudie ce problème en y incorporant diverses contraintes de production, de transport et de stockage, en considérant les aspects d'efficacité énergétique et les impacts environnementaux d'émission carbone, sous divers contrats et diverses structures de coûts et de capacité. J'utilise les outils de la recherche opérationnelle (RO) et de l'optimisation combinatoire pour résoudre les problèmes d'optimisation associés d'une manière efficace. Les mesures d'efficacité algorithmique considérées en RO sont souvent la proximité à la solution optimale et le temps de résolution des méthodes proposées.

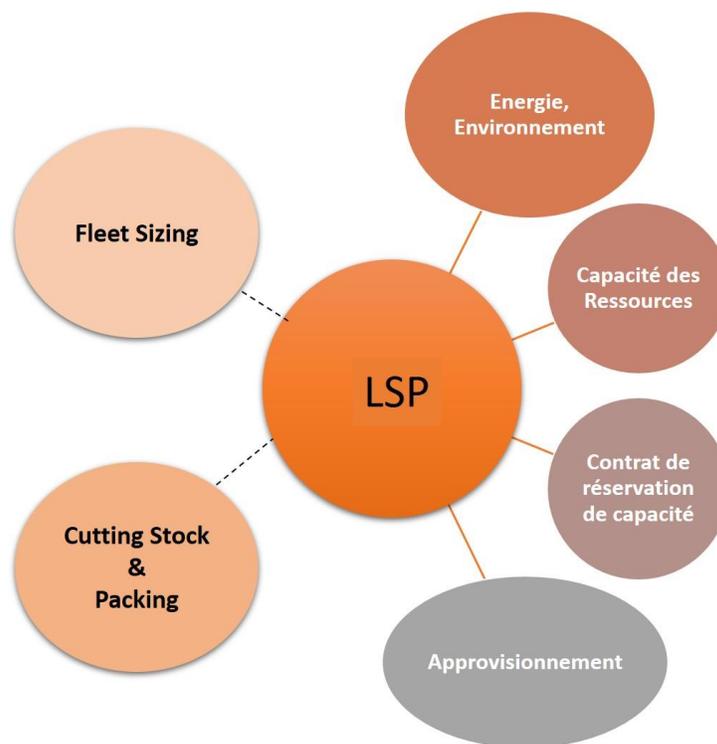


Figure 2. Mes axes de recherche autour du LSP couplé à d'autres problèmes.

Si le problème de dimensionnement de lots constitue le cœur de la grande majorité de mes activités de recherche et de mes publications, je travaille depuis plus récemment sur des problèmes de Cutting & Packing et de Fleet sizing. J'essaie de coupler ces problèmes avec le problème de dimensionnement de lots pour donner lieu à des problèmes à la fois intéressants du point de vue théorique et répondant à des problématiques industrielles. Ces derniers problèmes vont être détaillés plus loin dans ce manuscrit, particulièrement pour donner des perspectives de recherche. Je collabore actuellement avec des chercheurs en France, aux Etats-Unis, au Portugal, en Tunisie et en Turquie pour étudier les différents problèmes

d'optimisation cités ci-dessus, et également pour diffuser les nouveautés scientifiques et pour partager le plaisir de recherche avec un plus grand nombre.

Avant de détailler mes travaux de recherche gravitant autour du LSP, je présente une petite introduction à ce problème de planification de production.

Lot sizing problem (LSP) et différents outils de modélisation/résolution

Le problème de dimensionnement de lot (appelé LSP dans le reste de mon manuscrit) est un modèle de planification de la production et des approvisionnements. Il s'agit de décider quand et combien produire (ou commander) pour satisfaire des demandes (d), connues de façon ferme ou prévisionnelle, période par période sur un horizon de temps fini ($1..T$) avec T le nombre de périodes considéré. Lorsqu'il s'agit d'un producteur qui fabrique des produits dans son atelier, les coûts impliqués sont d'une part un coût de setup de production (f_t), payé à chaque période de production indépendamment de la quantité produite, et d'autre part un coût unitaire de production $p_t(\cdot)$ et coûts de stockage (h_t) des unités destinées à satisfaire les demandes futures. Notez que l'indice t de ces coûts veut dire qu'ils peuvent varier dans le temps. Lorsqu'il s'agit d'un détaillant qui se fait approvisionner des produits depuis un fournisseur, les coûts impliqués sont : coût fixe de commande, (symétrique au coût de setup de production), coût unitaire d'approvisionnement (symétrique au coût unitaire de production) et coût de stockage des unités approvisionnées restant en stock. Voir Figure 3 pour une illustration simple des coûts de production ou d'approvisionnement pour le LSP.

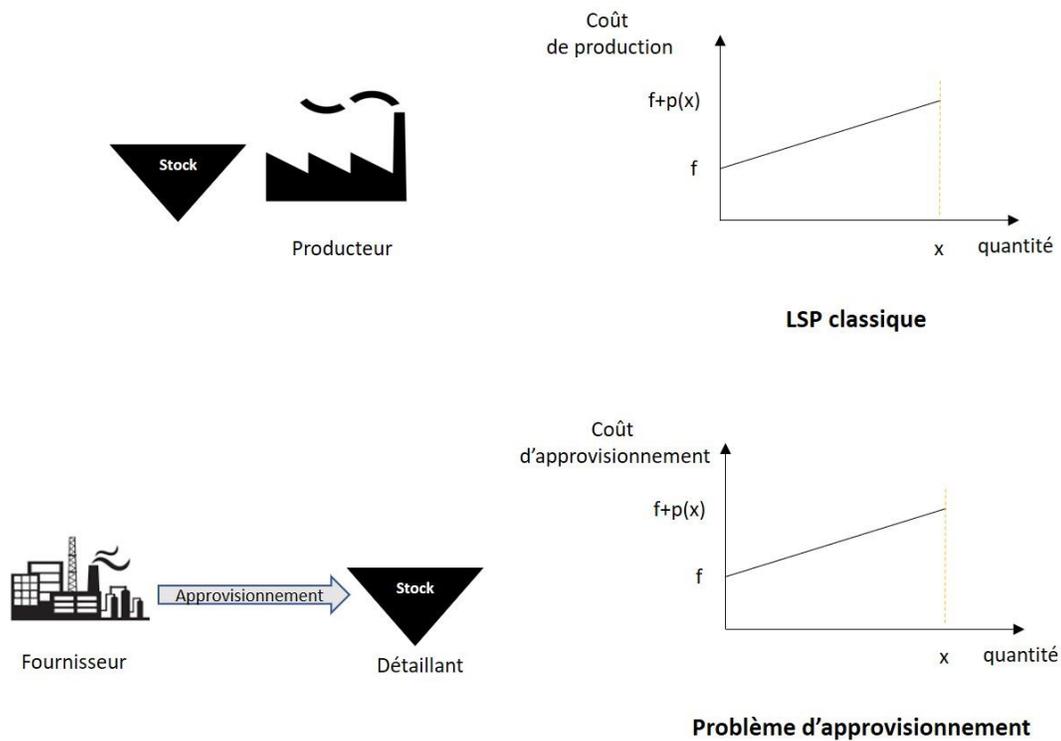


Figure 3. Illustration du coût de production ou d'approvisionnement pour le LSP.

Ces deux problèmes, production et approvisionnement, conduisent à la même modélisation mathématique d'un LSP. Le LSP peut être étendu à des modèles beaucoup plus complexes en y ajoutant de nouvelles contraintes et de nouveaux coûts. Pour plus de détails sur le LSP à mono-produit, le lecteur peut se référer aux articles de Brahim *et al.*, (2006)¹ et Brahim *et al.*, (2017)². Dans la suite, nous nous restreignons au cas mono produit (sauf le problème multi item CLSP). Nous donnons en premier lieu les différentes formulations mathématiques qui existent dans la littérature sous forme de PLNE pour ce problème, puis une modélisation par un problème de flot dans un réseau (*network flow*) et enfin nous donnons un petit aperçu de la formulation récursive en programmation dynamique. Dans les sections qui suivent nous allons nous baser sur ces formulations afin de modéliser les diverses variantes de LSP étudiées, ce qui nous permettra de mieux positionner nos contributions dans la littérature.

Formulations en PLNE (programme linéaire en nombres entiers) pour le ULSP

Dans la littérature il existe différentes formulations en programmation linéaire en nombres entiers permettant de modéliser le problème LSP mono produit (voir Pochet et Wolsey (2006)). La formulation la plus classique, appelée « Aggregated formulation (AGG) » est basée sur l'utilisation de deux familles de variables de décision, nommées x_t pour la quantité à produire à une période t donnée, et s_t pour la quantité à stocker en fin de période t , ceci pour chaque période t de l'horizon de la planification. La contrainte principale (1) provient de la conservation de matière : la quantité produite x_t et la quantité en stock en début de la période t servent à satisfaire la demande d_t , et le restant constitue le niveau de stock en fin de période t . La contrainte (2) permet de forcer à 1 la variable binaire de setup de production si une quantité positive est produite à une période donnée (avec M une limite supérieure sur la quantité à produire, ici $M_t = \sum_{i=t}^T d_i$). La contrainte (3) assure que le niveau de stock soit nul à l'entrée et à la sortie de l'horizon de planification. Notez que cette hypothèse est valable sans perte de généralité dans le cas déterministe où les demandes sont connues tout au long de l'horizon. Il suffit de soustraire le stock existant des demandes des premières périodes jusqu'à ce que ceci atteigne le niveau 0.

$$\begin{array}{ll}
 \min \sum_{t=1}^T (f_t y_t + p_t x_t + h_t s_t) & \\
 \text{s.t. } x_t + s_{t-1} = d_t + s_t, \text{ for all } t & (1) \\
 x_t \leq M_t y_t, \text{ for all } t & (2) \\
 s_0 = s_T = 0 & (3) \\
 x \in \mathbb{R}_+^T, s \in \mathbb{R}_+^{T+1}, y \in \{0,1\}^T & (4)
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array}} \right\} \text{AGG (Aggregated formulation)}$$

¹ Brahim, N., Dauzère-Pérès, S., Najid, N. M. & Nordli, A., 2006. Single item lot sizing problems, *EJOR*

² Brahim, N., Absi, N., Dauzère-Pérès, S. & Nordli, A., 2017. Single-Item Dynamic Lot-Sizing Problems: An Updated Survey, *EJOR*

Il est facile de transformer cette formulation en une formulation équivalente en éliminant les variables de stockage s_t , qu'on appellera dans la suite Formulation Sans Variable de Stock (SVS). Il suffit de remplacer s_t par $\sum_{i=1}^t (x_i - d_i)$ en utilisant la positivité des variables s_t . Le but de cette transformation est de pouvoir se concentrer uniquement sur les quantités à produire sans avoir à considérer les quantités à stocker. Dans les approches de résolution que je développe avec mes collègues, lorsqu'il s'agit de proposer des propriétés de dominance, je préfère utiliser la formulation SVS. Ceci me permet de plus facilement réfléchir sur les propriétés des solutions optimales. La notation D_{1t} est utilisée pour décrire la quantité cumulative de demande entre les périodes 1 et t, avec $D_{1t} = \sum_{i=1}^t d_i$. Ainsi D_{tT} est la quantité totale des demandes entre les périodes t et T.

$$\begin{array}{l}
 \min \sum_{t=1}^T (f_t y_t + (p_t + \sum_{i=t}^T h_i) x_t + h_t D_{1t}) \\
 \text{s.t. } \sum_{t=1}^T x_t = D_{1T} \\
 \sum_{i=1}^t x_i \geq D_{1t}, \quad \text{for all } t \\
 x_t \leq D_{tT} y_t, \quad \text{for all } t \\
 x \in \mathbb{R}_+^T, y \in \{0,1\}^T
 \end{array}
 \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \min \\ \text{s.t.} \end{array}} \right\} \text{SVS (Sans Variable de Stockage)}$$

Les trois autres formulations utilisent des variables de décision différentes. Facility Location based formulation (FAL) se base sur la variable x_{ij} qui définit la quantité produite à la période i pour satisfaire la demande de la période j. Une variable similaire à x_{ij} est utilisée dans la formulation Multi-Commodity based formulation (MC) mais avec une petite différence : cette fois-ci x_{ij} définit la fraction de la demande de la période j produite à la période i. Les contraintes qui en découlent sont donc basées sur un multi-commodity flow, d'où son nom. La dernière formulation en PLNE couramment utilisée dans la littérature est la Shortest Path based formulation (SPF). Celle-ci est directement dérivée de l'algorithme de programmation dynamique utilisé pour résoudre le LSP sans capacité de production (ULSP). Nous donnons uniquement la formulation FAL, qui a été la plus utilisée dans mes travaux de recherche avec la formulation AGG. Le lecteur peut se référer au livre de Pochet et Wolsey (2006) pour avoir plus de détails sur les deux autres formulations citées ci-dessus.

$$\begin{array}{l}
 \min \sum_{t=1}^T (f_t y_t + \sum_{i=t}^T p_{ti} x_{ti}) \\
 \text{s.t. } \sum_{i=1}^t x_{it} = d_t, \quad \text{for all } t \\
 x_{it} \leq d_t y_i, \quad \text{for all } i, \text{ for all } t \\
 x \in \mathbb{R}_+^{TxT}, y \in \{0,1\}^T
 \end{array}
 \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} \min \\ \text{s.t.} \end{array}} \right\} \text{FAL (Facility Location based formulation)}$$

avec le nouveau paramètre de coût de production
 $p_{ti} = p_t + h_t + \dots + h_{i-1}, (t \leq i)$

Pour le LSP sans capacité de production (Uncapacitated Lot Sizing Problem – ULSP), les trois formulations FAL, MC et SPF donnent la solution optimale entière sans branchement. Ce qui veut dire qu'on n'a pas besoin d'effectuer l'algorithme de Branch & Bound pour ces formulations, leur relaxation linéaire donne directement la solution optimale entière. Par contre, lorsque d'autres contraintes de capacité sont ajoutées dans le problème initial, on perd cette propriété forte. Pour le CLSP (Capacitated Lot Sizing Problem), nous avons effectué plusieurs tests numériques en utilisant les solveurs commerciaux pour comparer l'efficacité de ces 4 formulations. Notre conclusion est qu'il est très difficile de prédire a priori laquelle sera la plus efficace sur une instance donnée. Pour certaines instances AGG donne la solution optimale en quelques secondes, alors qu'elle peut s'avérer très lente pour d'autres instances, en laissant sa place aux autres formulations.

Network flow formulation pour LSP

Les problèmes de flots dans les réseaux (network flow) sont un outil très puissant servant à la fois à la modélisation et à la résolution de divers problèmes d'optimisation. ULSP peut être modélisé sous forme de network flow (voir Figure 4), où les nœuds 1 à 4 représentent les périodes, et le flot circulant sur un arc entre deux périodes consécutives représente le niveau de stock. Le nœud 0 est fictif et sert de source. Le flot circulant sur un arc entre la source et une période représente le niveau de production à cette période. Pour n'importe quel nœud $t \in 1..4$, l'équation de stock se traduit par la conservation du flot : tout ce qui rentre dans un nœud est égal à tout ce qui sort de ce nœud.

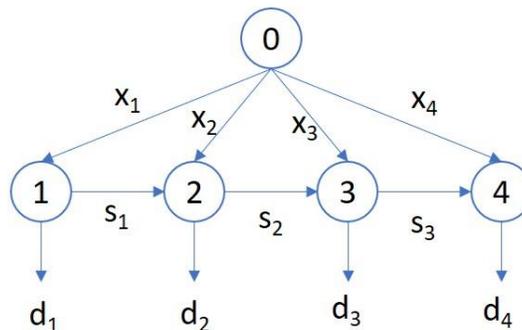


Figure 4. Network flow representation for ULSP.

La représentation par un network flow ne sert pas uniquement à dessiner de jolis graphes, elle permet également de résoudre les problèmes d'optimisation associés en se servant des techniques spécifiques aux flots dans les réseaux. Dans mes travaux de recherche, nous nous sommes également servis des propriétés très intéressantes des flots dans les réseaux afin de démontrer certaines propriétés de dominance des solutions. C'est un outil très puissant et élégant qui permet de simplifier la démonstration de diverses preuves mathématique dans nos travaux de recherche. Voir le livre Network Flows de Ahuja *et al.* (1993) pour plus de détails théoriques.

Programmation dynamique

C'est l'approche de résolution la plus utilisée dans la littérature pour le LSP à un seul produit (voir Brahimi *et al.* (2006)). Même pour le CLSP avec des paramètres arbitraires, qui a été montré NP-complet par Bitran et Yanasse (1982), des algorithmes de programmation dynamique pseudo-polynomiaux ont été proposés et ils restent assez efficaces comparés à des procédures par séparation et évaluation (Branch & Bound, B&B). Dans la littérature, le premier programme dynamique destiné à résoudre ULSP est proposé par les auteurs Wagner et Whitin (1958). Ci-dessous, nous donnons quelques explications préliminaires sur le fonctionnement de la récursivité pour le ULSP. Les détails peuvent être trouvés dans Akbalik (2006). Dans les prochaines sections, je donnerai quelques détails théoriques de nos résultats où nous avons utilisé la récursivité et la programmation dynamique.

Pour formuler la programmation dynamique résolvant ULSP, nous considérons T périodes. Dans chaque période t il y a $BS(s(t))$ états. $BS(s(t))$ représente le niveau de stock maximum qu'on peut avoir en fin de période t . Celui-ci peut être calculé sous la forme suivante :

$$BS(s(t)) = \min \left\{ \sum_{k=1}^t (x_k - d_k), D_{tT} \right\}$$

A la fin d'une période t donnée, on ne peut pas stocker plus que la quantité totale produite moins la quantité totale satisfaite depuis le début de l'horizon jusqu'à la fin de t . Pour chaque état $(t, s(t))$ qui correspond au couple (période t , niveau de stock en fin de la période t), on doit décider la quantité à produire à t . La borne inférieure $BI(x(t))$ et supérieure $BS(x(t))$ associée à la variable de décision x_t sont respectivement ;

$$BI(x(t)) = \max\{0, d_t - s_t\} \text{ et } BS(x(t)) = D_{tT}$$

On doit produire au minimum ce qui est demandé à la période t si le stock initial disponible ne peut pas entièrement satisfaire cette demande. Pour la borne supérieure, on est limité par la capacité de production (dans le cas CLSP ayant une capacité limitée) et la demande totale restante jusqu'à la dernière période avec l'hypothèse du stock nul à la fin de l'horizon (pour le ULSP sans capacité). Le graphe correspondant à cette formulation a pour nœuds les états et pour arc le coût total pour passer d'un état d'une période t à un autre état de la période $t + 1$ avec la décision associée. Le but est de trouver le plus court chemin pour passer de l'état initial qui est la première période avec un niveau de stock initial nul ($s_0 = 0$) à l'état final qui est la période T avec un stock final nul ($s_T = 0$), et ceci tout en respectant les capacités des arcs (pour CLSP). La fonction objectif du problème peut s'écrire comme :

$\text{coutMin}_t(s_{t-1})$: Le coût total minimum que l'on paie pour satisfaire la demande sur les périodes $(t, t + 1, \dots, T)$, sachant que l'on a la quantité s_{t-1} disponible dans le stock au début de la période t

Nous effectuons une récursion en arrière où on considère $\text{coutMin}_{T+1}(s_T) = 0$. La formule de récurrence du programme dynamique s'écrit donc de la façon suivante :

$$\text{CoutMin}_t (s_{t-1}) = \min_{x_t} \{ p_t x_t + f_t \mathbb{1}_{x_t > 0} + h_t s_t + \text{CoutMin}_{t+1}(s_{t-1} + x_t - d_t) \}$$

Notez que la programmation dynamique permet de résoudre plusieurs extensions du LSP à la solution optimale, même après l'ajout des contraintes diverses, voir nos contributions théoriques plus loin.

La pertinence de l'utilisation du LSP dans la planification de production

Le modèle LSP est à la fois simple et pertinent. Il permet de capturer le compromis entre le coût de lancement d'un lot en production (ou le coût de commande fixe en cas d'approvisionnement), qui incite à faire des lots de taille importante pour réaliser des économies d'échelle, et le coût de stockage des produits qui incite à ne pas anticiper la production (ou la commande) trop tôt. Pour être simple, prenons l'exemple du problème de dimensionnement de lots sans contrainte de capacité de production. Dans la littérature, ce problème est appelé Uncapacitated Lot Sizing Problem (ULSP) ou directement Dynamic Lot Sizing Problem. Concernant ULSP, la décision reste très simple dans les deux cas extrêmes : (i) coûts de stockage très élevés par rapport au coût fixe de commande et (ii) coûts de commande fixe très élevés par rapport au coût de stockage. Dans le premier cas une production lot pour lot (ou juste à temps - JAT) donne la solution optimale, tandis que dans le second cas il suffit de commander une seule fois en début d'horizon pour être optimal. Le problème ULSP correspond à la version dynamique du fameux modèle de la quantité économique de commande (QEC, modèle de Wilson). Dans le ULSP, les coûts et les demandes peuvent varier dans le temps contrairement au modèle QEC où tous les paramètres sont considérés stationnaires. L'article pionnier de ULSP est publié par Wagner et Whitin (1958). Depuis, des milliers d'articles scientifiques ont été publiés par des centaines de chercheurs dans le monde entier. Plusieurs chercheurs ont proposé des algorithmes en temps polynomial pour résoudre ULSP. Voir Wagelmans *et al.* (1992), Federgruen et Tzur (1991), et Aggarwal et Park (1993), qui ont proposé indépendamment un algorithme en temps $O(T \log(T))$ pour le cas général et en temps $O(T)$ pour des coûts non-spéculatifs (appelés aussi WW costs, depuis le papier pionnier de Wagner et Whitin (1958)). Avec cette structure de coût une unité produite à la période t coûte toujours moins cher que si on la produisait à une période antérieure et on la stockait.

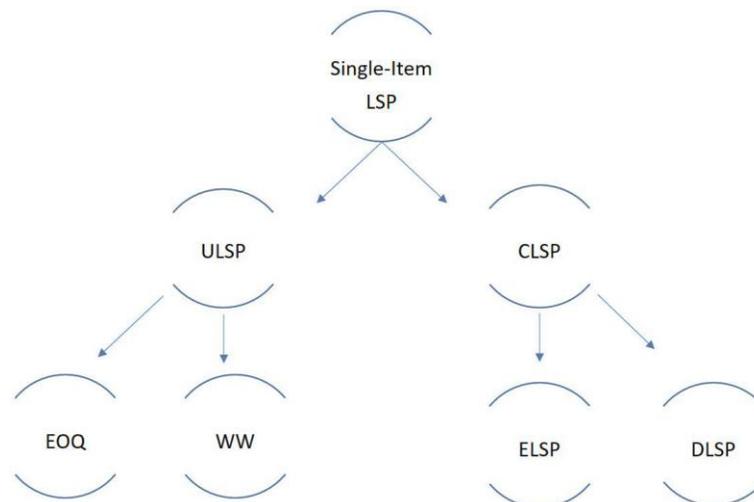


Figure 5. Classification du LSP mono-produit dans le cas déterministe. (ULSP: Uncapacitated LSP, EOQ: Economic Order Quantity, WW: Wagner & Whitin, CLSP: Capacitated LSP, ELSP: Economic LSP, DLSP: Discrete LSP)

Une des extensions la plus étudiée pour le cas mono-produit est le CLSP (Capacitated LSP) où une capacité de production limite la quantité pouvant être produite à chaque période. Le problème devient alors plus difficile à résoudre. La propriété ZIO (Zero Inventory Ordering) qui stipule que l'on ne commande que si le

niveau de stock est nul n'est plus valide et l'optimalité des solutions ULSP pour les mêmes paramètres n'est plus assurée, voir Figure 6. Même pour des structures de coût assez simples, lorsque la capacité de production varie dans le temps, CLSP devient NP-complet. Pour plus de détails sur la complexité des problèmes associés, voir les articles pionniers de Florian *et al.* (1980), Bitran and Yanasse (1982). Le lecteur peut également se référer à la revue de littérature de Karimi *et al.* (2003). Une autre classe de problème intéressant en termes d'applications industrielles est le DLSP (Discrete LSP). Le DLSP consiste à contraindre CLSP avec une contrainte « all-or-nothing » : pour une période donnée, soit on produit en saturant la capacité de production, soit on ne produit rien. Cette hypothèse rend la structure du problème plus simple en enlevant une bonne partie des solutions réalisables du CLSP.

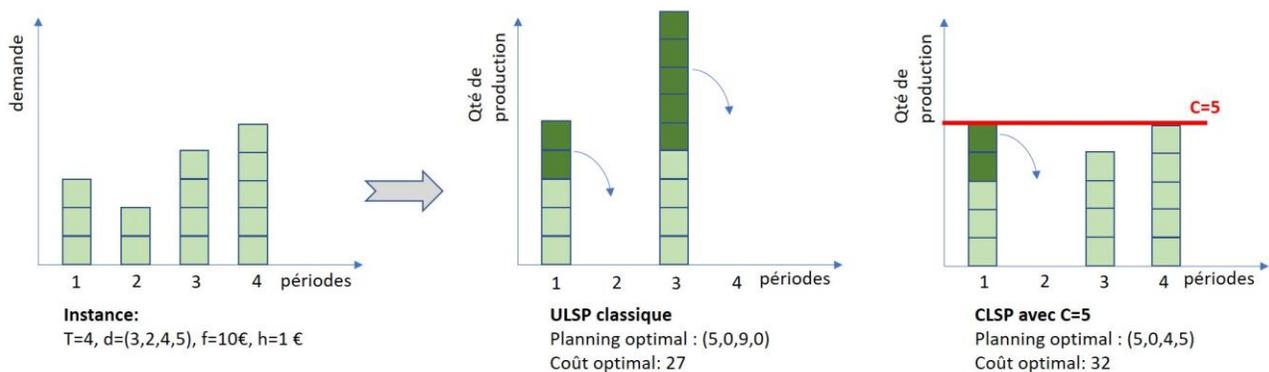


Figure 6. Planning de production optimal pour ULSP et CLSP.

Le LSP possède des aspects appliqués, où diverses contraintes de production, de stockage et de transport peuvent être intégrées facilement lors de la modélisation mathématique, et pose aussi de nombreuses questions théoriques en optimisation combinatoire. Le LSP est également intégré dans les modules de Production Planning (PP) des logiciels des ERP pour faire des calculs de MRP, voir Figure 7. Pour plus de détails sur les problèmes de planification de production modélisés avec des programmes linéaires en nombres entiers, voir Pochet et Wolsey (2006) qui introduisent également un chapitre entier sur les modèles de la planification de production utilisés dans les systèmes ERP et les calculs MRP (voir Chapitre 2).

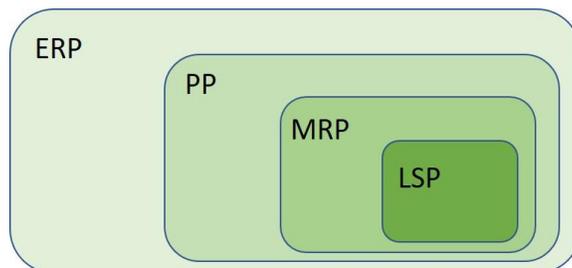


Figure 7. Illustration du calcul des tailles de lot au sein des ERP (ERP : Enterprise Resource Planning, PP: Production Planning, MRP : Material Requirement Planning, LSP : Lot sizing problem)

La méthodologie que j'utilise pour résoudre les problèmes d'optimisation associés au LSP

Les recherches autour du problème de dimensionnement de lots font appel à la plupart des outils de la recherche opérationnelle (programmation dynamique, flots, formulations étendues via programmation linéaire en nombres entiers, étude polyédrale -inégalités valides, enveloppes convexes-, ...) et sont publiées dans les meilleures revues. Depuis ma thèse de doctorat, j'ai développé et je continue à développer cette thématique de recherche, en publiant plusieurs articles portant sur des variantes de ce problème, en utilisant différentes approches de résolution (voir Publications). J'ai établi plusieurs collaborations scientifiques, à travers divers projet (2 Projets Régions, un projet PGMO-LMH), avec d'autres chercheurs du domaine. Ce domaine de recherche est très actif actuellement, avec un EURO working group LOT³, un groupe de travail national P2LS⁴ et un workshop annuel IWLS⁵ regroupant plus de 70 chercheurs du monde entier. Je suis un membre actif de ces groupes de travail, je donne régulièrement des séminaires aux journées de travail P2LS⁶ et au workshop IWLS (voir Section : Conférences & Workshop Internationaux).

L'une des raisons des nombreux travaux actuels dans le domaine du dimensionnement de lot est la nécessité de prendre en compte de nouvelles contraintes industrielles. D'une part une volonté croissante d'une production plus respectueuse de l'environnement, d'autre part la nécessité de résoudre efficacement les problèmes complexes de grande taille motive les chercheurs de notre domaine pour proposer des méthodes plus efficaces. Dans les projets que nous développons avec différents collègues, notre objectif est d'aller plus loin dans la prise en compte de différentes contraintes industrielles dans la planification de la production, à travers le modèle de dimensionnement de lot, pour essayer de répondre à quelques-uns des grands défis de l'usine du futur. Nous sommes convaincus que l'optimisation des processus de production sera plus que jamais au cœur de la compétitivité des chaînes logistiques, en termes de réduction des coûts et des délais, et de la maîtrise des impacts environnementaux.

Afin de résoudre d'une manière efficace les problèmes d'optimisation associés à ces problèmes intégrés du domaine de la planification de production, de stockage et de transport, je mets en œuvre la démarche scientifique que je suis dans la majorité de mes projets de recherche : Tout commence par la modélisation mathématique des diverses contraintes et de la fonction objectif du problème de départ. Pour ce faire, je regarde en premier si tout est modélisable à travers des équations linéaires. L'intérêt de passer par des programmes linéaires, souvent en nombres entiers (PLNE), est dû aux méthodes de résolution efficaces et aux logiciels puissants qui existent. Une fois que la formalisation mathématique est faite, ces modèles en PLNE sont implémentés et résolus par des solveurs commerciaux (Cplex, Xpress, etc.). Ces derniers permettent d'avoir une bonne idée sur la solution optimale. Pour certains problèmes, nous pouvons obtenir la solution optimale en temps raisonnable même pour des instances assez grandes ; pour d'autres, il est

³ URL de l'Euro Working Group sur le lot-sizing: <http://www.emse.fr/~absi/EWGLOT/>

⁴ <http://p2ls.emse.fr/index.html>

⁵ <http://iwls.emse.fr/>

⁶ <http://gdrro.lip6.fr/?q=node/108>

difficile d'obtenir une solution satisfaisante. L'écart entre la meilleure solution réalisable et la meilleure borne inférieure (pour un problème de minimisation) peut être beaucoup trop grande pour être acceptable. Pour certains problèmes, nous pouvons avoir de bonnes idées sur les contraintes intéressantes à ajouter dans la formulation pour éliminer les zones réalisables du polyèdre associé, mais ne contenant pas la solution optimale. Cette démarche fait partie de l'approche polyédrale que je détaillerai plus loin. Notre but est d'analyser et d'étudier la structure de ces problèmes pour lesquels nous cherchons à trouver d'autres méthodes de résolution plus efficaces, qui donneraient la solution optimale (ou proche de l'optimale) en temps raisonnable.

Lorsque le problème semble trop gros avec un nombre important de contraintes et de variables de décision, je commence à étudier des propriétés de dominance pour des cas simples, en faisant des hypothèses supplémentaires. Cette approche me permet de bien analyser le cœur du problème et de voir la structure des solutions optimales sous diverses hypothèses simplificatrices. Cette étape est primordiale pour la bonne compréhension de la structure du problème initial. Dans la suite, je recherche s'il existe des algorithmes efficaces en me basant sur ces propriétés d'optimalité. Ces algorithmes sont souvent basés sur la récursivité en passant par la programmation dynamique, ou peuvent être gloutons, ou encore ils sont issus d'une approche de décomposition. L'efficacité des algorithmes proposée concerne à la fois leur temps de résolution et surtout leur performance en termes de proximité à la solution optimale. A cette étape, la théorie de la complexité vient à notre aide. Lors de la recherche d'un algorithme efficace, nous pouvons donner la garantie qu'aucun algorithme en temps polynomial peut exister pour résoudre notre problème si celui-ci est classé parmi les problèmes NP-complets, à moins que $P=NP$. Dans mes travaux de recherche, avec mes collègues, nous avons déterminé la complexité de plusieurs problèmes d'optimisation encore ouverts en les classant soit comme NP-difficiles, soit comme polynomiaux. Parmi ceux qui sont classés comme NP-difficiles, il y en a certains démontrés NP-difficiles au sens fort et certains NP-difficile au sens faible. Notez qu'il ne peut exister d'algorithme pseudo-polynomial, à moins que $P=NP$, pour un problème difficile au sens fort. Les détails de nos contributions dans la littérature sont donnés dans les prochaines sections.

Dans la suite de ce chapitre, je vais décrire différents axes de recherche que j'ai développés et que je continue à développer avec différents collègues depuis 2003 (début de ma thèse de doctorat) autour de la planification de production et du LSP. Je vais également introduire quelques-uns de nos résultats dans le domaine du dimensionnement des flottes de véhicules (fleet sizing problem). Les nouvelles problématiques que je traite en RO et en optimisation combinatoire, plus centrées sur les problèmes de Cutting Stock & Packing, couplés ou non avec le LSP, seront présentées dans la partie Projet de recherche et Perspectives. Voir Figure 8 pour les problèmes présentés dans ce chapitre.

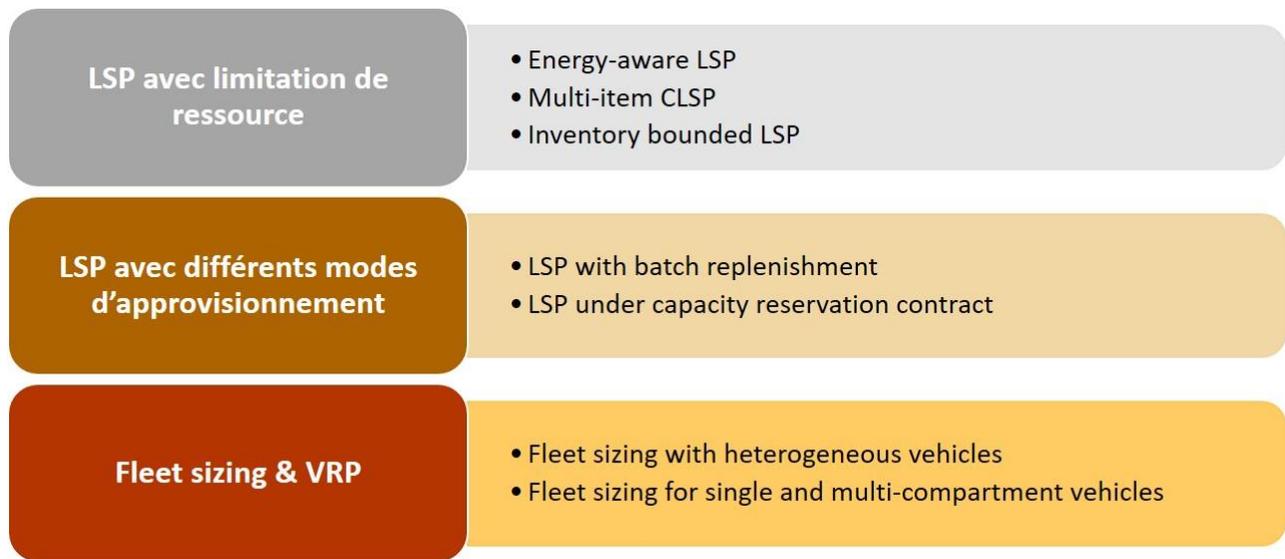


Figure 8. Mes thématiques de recherche détaillées dans cette partie « Bilan de recherche ».

PARTIE II.1

LOT SIZING PROBLEM AVEC LIMITATION DE RESSOURCE

Dans beaucoup de cas industriels, les capacités de production, de transport ou de stockage ne sont pas illimitées et de telles hypothèses simplificatrices conduisent à des solutions non acceptables en pratique. Relâcher les contraintes de capacité conduit au problème ULSP pour lequel la propriété de dominance ZIO permet de restreindre drastiquement l'espace de recherche de la solution optimale. Cette propriété n'est valide que pour des coûts concaves, et elle signifie qu'il est plus profitable de produire une unité aujourd'hui plutôt que d'anticiper sa production et de la stocker. L'idée est de rechercher la solution optimale parmi celles qui couvrent entièrement les demandes des périodes futures. Si une demande d'une période est fractionnée pour être produite seulement en partie à une période précédente, on peut facilement montrer qu'il existe une meilleure solution où celle-ci ne sera pas fragmentée. Voir le planning optimal donné pour le ULSP classique dans la Figure 6 et voir Figure 9 pour une illustration des coûts sur chaque arc de cette instance. On peut alors mettre en correspondance la politique ZIO avec les chemins dans le graphe acyclique où chaque sommet est une période et chaque arc (u,v) représente le coût de produire à la période u les demandes des périodes u à $v-1$. Une fois que tous les coûts sont calculés, il suffit d'exécuter n'importe quel algorithme du plus court chemin (SPP) afin de trouver la solution optimale pour ce graphe. Notez que nous utilisons le même type d'approche pour les LSP où le ZIO n'est plus valide. Nous découpons le problème global de T périodes en intervalle de périodes (u,v) avec $1 \leq u \leq v \leq T$ en supposant qu'en début de périodes u et v nous ne disposons pas de stock. Ceci nous conduit à résoudre le planning associé à chaque sous plan (u,v) efficacement, trouver le coût optimal pour chacun et enfin calculer le coût global en utilisant un algorithme du PCC.

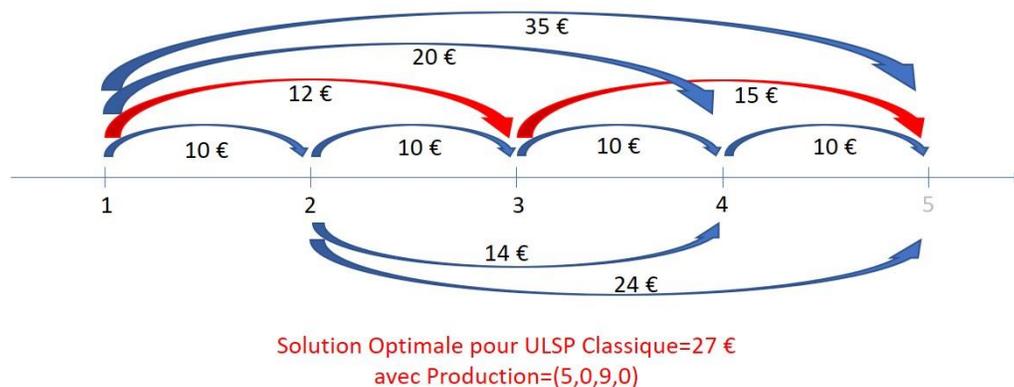


Figure 9. Représentation en réseau de ULSP en utilisant la propriété ZIO.

Lorsque la capacité de production devient une contrainte à respecter, la propriété ZIO n'est plus valide et nous sommes ramenés à trouver d'autres propriétés de dominance pour limiter l'espace de recherche de solution réalisables. Le but est de réduire le temps de résolution de ces problèmes d'optimisation. Il est toujours possible de modéliser un système de production, de transport et de stockage avec des modèles

mathématiques quitte à faire des simplifications pour ne pas rendre les modèles proposés trop complexes. Les logiciels commerciaux permettent de résoudre des instances de très grande taille lorsque les modèles mathématiques restent linéaires. Par contre, pour les problèmes combinatoires en nombres entiers, le temps de résolution peut être extrêmement grand, tellement grand qu'il nous faudrait plusieurs mois pour trouver une solution acceptable. Afin de remédier à ceci, le but dans nos recherches est de proposer des propriétés d'optimalité en analysant les structures de ces problèmes afin de réduire la taille de l'espace des solutions réalisables.

La particularité de ma démarche scientifique :

Parmi les méthodologies que j'utilise lors de la résolution des problèmes, l'une dont je me sers très souvent est basée sur la réduction de l'ensemble des solutions réalisables à évaluer pour en choisir la meilleure. Ceci peut se faire de différentes manières. Voici quelques axes que j'utilise dans mes travaux de recherche :

- Je propose des propriétés de dominance après une analyse approfondie de la structure d'une solution optimale. Ces propriétés sont souvent utilisées pour réduire le nombre d'états à parcourir dans les algorithmes de programmation dynamique et nous permettent de développer des algorithmes ad hoc efficaces.
- Je propose des coupes sous forme d'inégalités valides pour élaguer certaines parties du polyèdre ne contenant pas de solutions faisables. Ceci fait partie de l'approche polyédrale où notre objectif est de décrire l'enveloppe convexe afin de pouvoir relâcher les contraintes d'intégralité des variables. Si on dispose de l'enveloppe convexe d'un problème modélisé en PLNE, la solution optimale est directement trouvée à la racine, en résolvant la relaxation linéaire à l'aide de méthodes efficaces comme Simplexe par exemple. Mais ceci reste un « rêve » pour beaucoup de problèmes d'optimisation et souvent nous nous contentons de proposer des inégalités valides ou des facettes pour améliorer la formulation initiale.
- Je propose des algorithmes spécifiques et propres au problème étudié en essayant de parcourir une partie des solutions intéressantes, tout en restant une méthode exacte. Cette approche nécessite d'une part une bonne connaissance du domaine, d'autre part l'inventivité et la créativité. C'est une tâche difficile à réaliser, car il ne suffit pas de proposer un algorithme qui semble donner la solution optimale, mais il faut prouver son optimalité pour n'importe quelle instance.

Compte tenu des trois points cités ci-dessus, je peux classer mes travaux de recherche parmi le monde des méthodes exactes. Dans le domaine de la recherche opérationnelle et de l'optimisation, il y a un monde des méthodes approchées, constitué des heuristiques, des métaheuristiques, des matheuristiques, des techniques de décomposition ou de relaxation ; et un monde des méthodes exactes, constitué de Branch & Bound, Branch & Cut, Branch & Price, programmation dynamique, etc. Si on regarde attentivement l'article de survey très récent de Brahimi *et al.* (2017), on peut remarquer qu'entre 2004 et 2016, le plus grand nombre de papiers publiés utilisent la programmation dynamique (donc méthode exacte). La deuxième place revient aux méthodes basées sur l'utilisation des heuristiques, suivies par les méthodes utilisant l'approche

polyédrale. En dernier viennent les papiers établissant des résultats de complexité ou proposant d'autres méthodes difficiles à classer. Notre démarche scientifique face à un nouveau problème est de l'analyser pour bien comprendre sa structure, et ensuite proposer des méthodes appropriées afin de fournir la solution optimale. J'ai donc une certaine fierté à positionner mes travaux de recherche parmi les méthodes exactes, ce qui demande souvent plus de patience et plus de temps, avec un chemin pouvant être assez périlleux si on veut atteindre de bons résultats.

Malgré la simplicité de sa description et la structure spéciale des solutions dominantes associées au cas sans restriction de capacité (ULSP), la complexité du LSP est influencée par différents paramètres : le nombre de différents types d'items produits, la contrainte de capacité, la structure de coût d'approvisionnement et de stockage, la configuration des demandes, etc., voir Karimi *et al.* (2003) pour plus de détails.

Dans cette partie, je vais présenter quelques travaux que j'ai effectués avec différents collègues autour du LSP avec certaines limitations de ressources. La première extension présentée dans la Section II.1.1 est basée sur le niveau d'énergie disponible à chaque période. En considérant la consommation énergétique de chaque activité de production, l'objectif est de proposer un planning optimal qui tienne compte à la fois des contraintes de production et des contraintes énergétiques tout en minimisant les coûts de production, de stockage et les coûts énergétiques. Dans la Section II.1.2, je présenterai quelques résultats récents que nous avons proposés pour le CLSP (Capacitated LSP) multi-item, qui est un problème NP-complet. Ces résultats sont issus d'un projet que nous menons à l'Université de Porto, sur un problème industriel. Dans la Section II.1.3, je présenterai un autre modèle de LSP qui tient compte des restrictions au niveau de l'espace de stockage. Même si la capacité de stockage semble moins contraignante que la capacité de production, nous allons montrer que la complexité des problèmes associés est directement affectée par cette limitation.

II. 1. 1. ENERGY-AWARE LOT SIZING PROBLEM

Ce thème de recherche a été initié avec Céline Gicquel, Bernard Penz et Christophe Rapine dans le cadre d'un projet région financé par la région Lorraine et l'université de Lorraine sur la période 2015-17. Nous continuons encore notre collaboration avec les mêmes collègues, ayant obtenu un 2^e financement par un projet LMH-PGMO sur la période 2017-19.

Notre problématique traite la prise en compte des coûts et des contraintes énergétiques dans la planification de la production, à travers le modèle de dimensionnement de lot, pour essayer de répondre à quelques-uns des grands défis de l'usine du futur : maîtrise des impacts énergétiques et environnementaux tout en réduisant les coûts. Il s'agit de proposer des méthodes d'optimisation et des outils d'aide à la décision suffisamment génériques pour répondre à ces problématiques où les coûts et les consommations énergétiques sont intégrés au sein des plannings de production. Les revues de littérature récentes de Biel et Glock (2016) et Gahm *et al.* (2016) présentent l'état de l'art sur la planification de production et les problèmes d'ordonnancement avec la prise en compte des contraintes énergétiques. Les questions de recherche qui ont motivé notre projet étaient :

- Comment moduler la production pour s'adapter aux prix et à la disponibilité de l'énergie, avec des contrats d'approvisionnements d'énergie pouvant être complexes ? Cette utilisation de l'énergie en fonction de sa disponibilité au cours d'une journée et en fonction de sa courbe de coût conduit à une consommation « intelligente » de l'électricité, dit « smart grid ».
- Comment et quand stocker de l'énergie pour l'utiliser au sein de notre système de production ?
- Comment les décisions de planification de production seront impactées par des incertitudes liées à la disponibilité des ressources d'énergie renouvelable et à la variation de la demande ?

Nos recherches ont répondu en partie au premier point, les deux autres points constituant encore nos perspectives. Dans la littérature, excepté les problèmes d'ordonnancement et les systèmes flowshop, nous sommes les premiers à avoir intégré les contraintes énergétiques au sein du LSP discret. La question qui peut naturellement se poser à cette étape est « en quoi ces nouvelles contraintes énergétiques rendent les problèmes de LSP associés différents de ceux qui existent actuellement dans la littérature ? ». Afin d'être sûr que le modèle mathématique qui découle de ces nouveaux problèmes que nous étudions est original et sans précédent, nous faisons une étude très minutieuse de la littérature. Après avoir modélisé le PLNE, nous passons beaucoup de temps à chercher sous d'autres noms et dans d'autres domaines annexes au LSP et à l'ordonnancement les problèmes similaires. C'est lors de cette étude et cette analyse minutieuse des travaux existants que nous raffinons notre modèle après plusieurs réflexions afin de cibler un problème non encore traité tel quel dans la littérature. Le lecteur peut se référer à mes diverses publications pour observer les tableaux de contribution et de positionnement dans l'état de l'art que j'ai l'habitude d'ajouter en début de chaque travail de recherche. Dans chaque projet, nous avons le réflexe de fournir un tableau croisé des articles du domaine que nous traitons. Néanmoins, nous sommes conscients qu'aucun chercheur n'est à l'abri de tomber sur des modèles similaires déjà traités dans la littérature une fois le travail terminé. C'est

aussi le côté risqué du monde de la recherche. Ceci montre qu'il existe plusieurs équipes de chercheurs qui traitent des problèmes similaires dans le monde entier et nous ne sommes pas les seuls à utiliser ces techniques pour répondre aux questions qui surgissent dans les systèmes de production.

Dans nos deux publications récentes Rapine *et al.* (2018a)⁷ et Rapine *et al.* (2018b)⁸, nous avons étudié un système de production composé de plusieurs machines identiques, parallèles, ayant une capacité de production limitée à chaque période. La particularité de notre problème est la prise en compte d'une limitation de niveau d'énergie disponible à chaque période. Je vais tout d'abord détailler nos résultats théoriques issues de notre publication Rapine *et al.* (2018a), ensuite nos résultats publiés dans Rapine *et al.* (2018b).

Dans Rapine *et al.* (2018a), nous avons supposé que le démarrage et le fonctionnement des machines (qu'elles produisent ou pas), ainsi que la fabrication des produits consomment toutes de l'énergie. L'objectif est de proposer un planning optimal de production minimisant le coût de production et de stockage et satisfaisant les demandes et les contraintes énergétiques. En plus de la décision de quand et de combien produire, nous devons également décider combien de machines démarrer et éteindre à chaque période pour minimiser l'énergie totale consommée et pour respecter la limitation énergétique.

Avant de donner la formulation en PLNE de ce problème que nous appelons energy-LSP, voici les différentes notations utilisées :

Lot-sizing problem on a time horizon T

- d_t : demand in period t
- c_t, h_t : unit production cost, unit holding cost in t .
We assume that costs are **non-speculative**: $c_t + h_t \geq c_{t+1}$
- U : capacity of each parallel machine (M machines in total)
- $f_t(k)$: cost to start-up k machines in period t
- K_t : joint set-up cost for producing in period t
- r_t : reservation cost, incurred by each machine running during t

With energy parameters

- E : available energy in period t
- p_t : energy consumption to produce one unit in period t
- w_t : energy consumption to start-up a machine in period t
- g_t : reservation energy consumption in period t

Les questions qui se posent sont donc : Combien de machines m_t^+ allumer et combien m_t^- éteindre à chaque période ? Combien produire et stocker (x_t et s_t) afin de minimiser les coûts de production, de stockage,

⁷ C. Rapine, G. Goisque, A. Akbalik, Energy-aware lot sizing problem: Complexity analysis and exact algorithms. **International Journal of Production Economics (2018a)**

⁸ C. Rapine, B. Penz, C. Gicquel, A. Akbalik Capacity acquisition for the single-item lot sizing problem under energy constraints. **Omega (2018b)**

d'allumage des machines et de consommation énergétique liée au fonctionnement des machines allumées à chaque période ?

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min & \sum_{t=1}^T (f_t(m_t^+) + c_t x_t + h_t s_t + r_t m_t + K_t y_t) \\ \text{s.t.} & s_{t-1} + x_t = s_t + d_t \quad \forall t \in \{1..T\} \\ & x_t \leq U m_t \quad \forall t \in \{1..T\} \\ & p x_t + w m_t^+ + g m_t \leq E \quad \forall t \in \{1..T\} \\ & m_t = m_{t-1} + m_t^+ - m_t^- \quad \forall t \in \{1..T\} \\ & m_t \leq M \quad \forall t \in \{1..T\} \\ & x_t \leq U M y_t \quad \forall t \in \{1..T\} \\ & s_t \geq 0, x_t \geq 0, y_t \in \{0, 1\}, \\ & m_t \in \mathcal{Z}^+, m_t^+ \in \mathcal{Z}^+, m_t^- \in \mathcal{Z}^+ \quad \forall t \in \{1..T\} \end{array} \right.$$

x_t : quantity produced in period t
 y_t : setup variable in period t
 s_t : quantity remainin in stock at the end of t
 m_t : the number of machines running in t
 m_t^+ : the number of machines turned on in t
 m_t^- : the number of machines turned off in t

La fonction objectif permet de minimiser le coût total engendré dans le système. La première contrainte est pour l'équilibrage des flux entrants et sortants à une période donnée. La 2^e contrainte est pour fixer la capacité de production en fonction du nombre de machines allumées et la 3^e contrainte indique la limite sur le niveau d'énergie. L'énergie disponible à une période t est consommée par la production des unités, par l'allumage des machines et par le fonctionnement de ces machines à cette période. La 4^e contrainte est le bilan donnant le nombre de machines en fonctionnement à une période donnée. La contrainte qui suit est pour limiter le nombre total de machines pouvant être en fonctionnement et la dernière contrainte sert à forcer à 1 les variables binaires de setup.

Nous avons proposé différents résultats de NP-complétude pour des cas restrictifs de ce problème (pour les détails, voir Théorème 1 à 4, Rapine et al. (2018a)). L'étude de complexité nous permet de classer le problème et ainsi de le traiter avec des approches scientifiques les plus appropriées. Voici la démarche classique que je suis :

- Est-il possible de proposer un algorithme efficace en temps polynomial pour ce problème ?
 - Oui, donc il fait partie des problèmes polynomiaux
 - Non, rien n'est sûr, peut-être qu'il est polynomial mais on n'est pas assez doué pour trouver le bon algorithme qui permettrait de le résoudre
- Est-ce que ce problème est NP-complet ?
 - Oui, nous avons réussi à faire la preuve en le réduisant depuis un problème déjà classé comme NP-complet. Le fameux livre de Garey et Johnson (1979) vient à notre aide à cette étape.
 - Non, soit on a déjà trouvé un algorithme en temps polynomial et on est content. On est sûr que ce problème n'est pas NP-complet. Ou alors, on n'a rien trouvé, ni d'algorithme en temps

polynomial, ni une preuve de complexité convaincante, donc encore, rien n'est sûr...

- Nous avons une preuve d'NP-complétude, mais nous avons également réussi à proposer un algorithme de programmation dynamique en temps pseudo-polynomial ; donc, notre problème est NP-complet au sens faible.

Retournons de nouveau à notre problème energy-LSP. Les résultats de complexité suivants que nous avons prouvés permettent de voir que même en faisant des hypothèses extrêmement fortes, le problème reste NP-complet.

Théorème 1. Si le nombre de machine M fait partie de l'instance, energy-LSP est NP-difficile même sans coût de production, sans coût de stockage, sans coût de fonctionnement de machine (reservation cost), avec le fonctionnement des machines supposé non-consommateur d'énergie, et avec des paramètres d'énergie étant stationnaires.

La preuve est basée sur une réduction depuis le fameux problème de Partition.

Un autre résultat de complexité que nous avons publié dans ce papier est le suivant :

Théorème 2. Energy-LSP est NP-difficile même pour une seule machine, et avec les paramètres suivants supposés nuls : $w_i=0$ (la consommation d'énergie pour démarrer une machine), $K_i=0$ (coût de setup de production joint à toutes les machines) et $g_i=0$ (la consommation d'énergie liée au fonctionnement d'une machine).

La preuve est basée sur le CLSP (Capacitated LSP), qui a été démontré NP-difficile par Florian et al. (1980).

Théorème 3. Energy-LSP est NP-difficile même pour une seule machine, et avec les paramètres suivants supposés nuls : $w_i=0$ (la consommation d'énergie pour démarrer une machine), $K_i=0$ (coût de setup de production joint à toutes les machines) et $r_i=0$ (coût de fonctionnement d'une machine qu'elle produise ou non).

L'idée de la preuve est nouveau basée sur la réduction du fameux problème CLSP.

Théorème 4. Energy-LSP est NP-difficile même pour une seule machine, et avec les paramètres suivants supposés nuls : $w_i=0$ (la consommation d'énergie pour démarrer une machine), $f_i=0$ (le coût de démarrage des machines), $r_i=0$ (coût de fonctionnement d'une machine qu'elle produise ou non) et $g_i=0$ (la consommation d'énergie pour faire fonctionner une machine).

De nouveau, la preuve est établie en faisant une réduction depuis CLSP.

Après ces quatre théorèmes, il est facile de voir que energy-LSP reste NP-complet même sous des hypothèses très restrictives en supposant plusieurs paramètres du problème nuls. Il est donc primordial de faire d'autres hypothèses et d'éliminer certains des paramètres afin de réussir à trouver des algorithmes en temps

polynomial. Nous avons donc proposé deux algorithmes en temps polynomial pour les cas, détaillés ci-dessous.

Algorithme en temps $O(M^5T^4)$

Nous avons proposé cet algorithme pour le cas sans coûts de setup de production ($K=0$), sans coûts de fonctionnement de machine ($r=0$) et une consommation énergétique liée au fonctionnement des machines ($g=0$) supposée négligeable. M est le nombre de machines dans le système de production et T est le nombre de périodes de planification de production. Les trois paramètres d'énergie doivent être stationnaires (la quantité d'énergie disponible E à chaque période, la consommation énergétique p pour produire une unité, l'énergie requise w pour démarrer une machine).

L'idée de cet algorithme est basée sur la décomposition de l'horizon en sous-plan (u,v) , avec les périodes u et v étant des périodes de régénération. Cela veut dire que le niveau de stock est nul en début de ces deux périodes. Ceci permet de décomposer le problème initial en T^2 sous-plans, chacun indépendant l'un de l'autre. Cette approche est bien connue dans la littérature et beaucoup utilisée par des chercheurs travaillant sur l'approche par programmation dynamique depuis le papier de Florian et Klein (1971). Jusque-là, rien d'original. Par contre, notre originalité se trouve dans la recherche de la résolution à l'optimum de chaque sous-plan. La créativité scientifique commence donc à cette étape de la recherche d'un algorithme efficace qui permet de trouver la solution optimale dans un sous-plan (u,v) donné. Une fois que tous les coûts associés aux sous-plans sont calculés, il suffit d'appliquer l'algorithme du plus court chemin pour déterminer le coût total global sur $1..T$. Alors, comment calculer efficacement le coût d'un sous-plan pour energy-LSP avec E , p et w stationnaires ? Voici une première propriété de dominance très intéressante que nous avons démontrée :

Propriété 1. Dans une solution dominante, chaque période t est soit :

- Une période de régénération avec $s_{t-1} = 0$, ou
- C-saturée, $x_t = m_t U$, ou
- E-saturée, $p x_t + w m_t^+ = E$

Voici la Figure 10 qui illustre ces trois cas. La preuve de cette propriété est basée sur un argument d'échange qui permet de déplacer une unité stockée à une période t vers une période ultérieure qui n'a pas encore saturée l'une des deux capacités : E ou C . Cette propriété est valide sous l'hypothèse des coûts de production non-spéculatifs (produire une unité et la mettre en stock coûterait plus cher que de la produire à une période ultérieure).

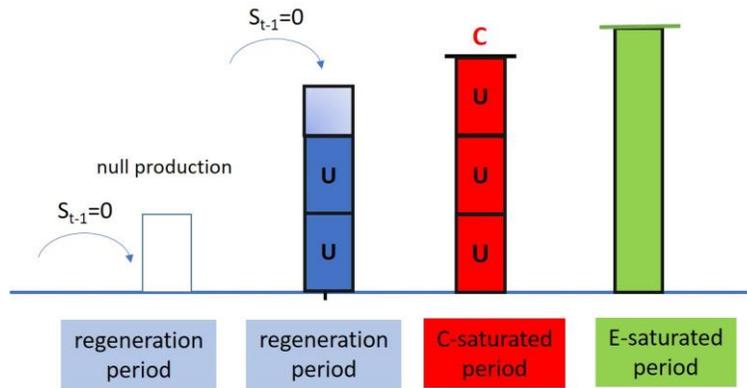


Figure 10. Illustration d'une solution dominante pour energy-LSP avec des paramètres d'énergie stationnaires et r, g et $K=0$.

Pour dérouler l'algorithme de programmation dynamique, nous devons connaître certaines informations qui sont nécessaires pour le calcul du nombre de machines à allumer à chaque période. Ces informations constituent le concept d'état dans la programmation dynamique. Voici l'état de notre algorithme récursif :

- m : number of machines running at the beginning of period t , before one decides how many machines m_t^+ to start in this period, that is, $m = m_{t-1}$.
- N_C : the sum of the number of the machines running during each period of \mathcal{B}_C over the time horizon $\{t, \dots, v-1\}$: $N_C = \sum_{i \in \mathcal{B}_C: i \geq t} m_i$
- N_E^+ : the sum of the number of machines started over the periods of \mathcal{B}_E over the time horizon $\{t, \dots, v-1\}$: $N_E^+ = \sum_{i \in \mathcal{B}_E: i \geq t} m_i^+$
- n_E : the number of periods of \mathcal{B}_E over the time horizon $\{t, \dots, v-1\}$, that is, $n_E = |\mathcal{B}_E \cap \{t, \dots, v-1\}|$

Etat de notre programme dyn. :

$$(t, m, N_C, N_E^+, n_E)$$

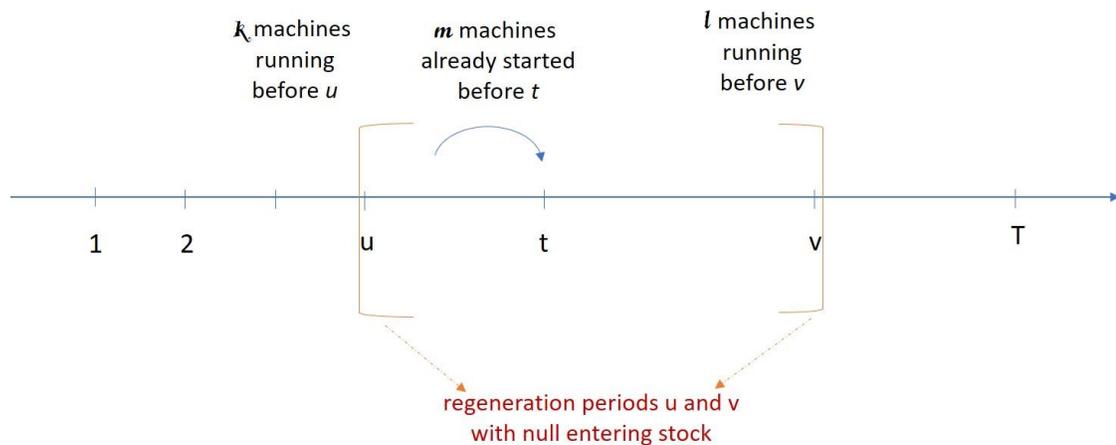


Figure 11. Illustration d'un sous-plan (u,v) et quelques informations nécessaires pour le programme dynamique.

En utilisant le principe de sous-optimalité, nous pouvons écrire la relation suivante :

$$\mathcal{C}(t, m, N_C, N_E^+, n_E) = \min_{m'=0, \dots, M} \{ \gamma_t(m, m') + \mathcal{C}(t+1, m', N_C - m', N_E^+, n_E) \}$$

Le coût $\gamma_t(m, m')$ correspond au coût de démarrage de m' machines sur la période t , sachant qu'on suppose m machines déjà en fonctionnement en début de la période t . Alors, le coût associé au sous-plan (u, v) avec le nombre de machines déjà en fonctionnement en début de période u étant k (respectivement l pour ce qui concerne la période v) devient facile à calculer :

The cost $\mathcal{S}(u, k, v, l)$ of the subplan starting at period u with k machines running can be obtained as :

$$\mathcal{S}(u, k, v, l) = \min \{ \gamma_t(k, m) + \mathcal{C}(u+1, m, N_C, N_E^+, n_E) \mid$$

$$0 \leq m \leq M, 0 \leq N_C \leq MT, 0 \leq N_E^+ \leq M, 0 \leq n_E \leq T \}$$

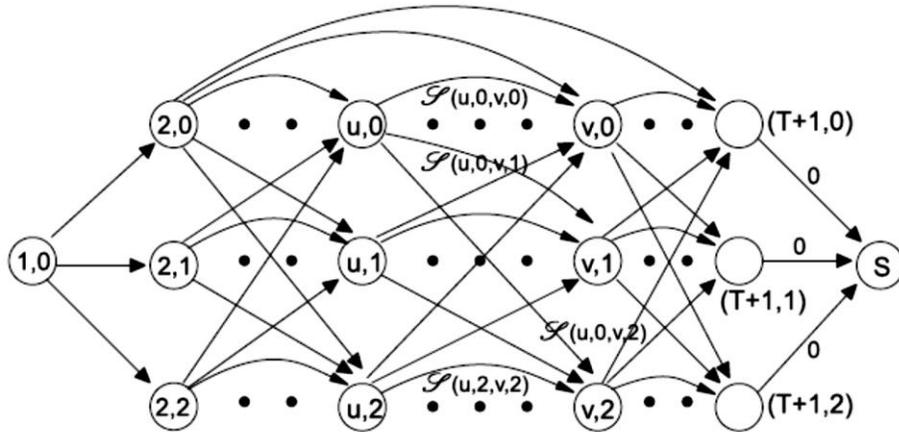


Figure 12. Représentation d'un graphe acyclique où le plus court chemin entre $(u=1, k=0)$ et S est calculé, pour $M=2$ machines.

Théorème 5. Energy-LSP peut être résolu en temps polynomial $O(M^5 T^4)$ si les paramètres p , w et E sont stationnaires et les paramètres K , r et g sont nuls.

Algorithme en temps $O(M^6 T^6)$

Nous avons proposé cet algorithme pour le cas général sans aucune restriction sur les coûts, mais en supposant les paramètres de consommation énergétique stationnaires comme dans le cas précédent. Le fait d'avoir un coût de setup de production non nul peut donner lieu à un planning avec des périodes où la production est nulle. De plus, le fait d'avoir un coût et une consommation énergétique associés au fonctionnement des machines peut inciter à éteindre certaines de ces machines (ou toutes) pour les allumer plus tard (pour faire une économie d'énergie). Dans ce modèle

général, la Propriété 1 est modifiée légèrement pour donner lieu à la Propriété 2 suivante :

Propriété 2. Dans une solution dominante, chaque période t est soit :

- Une période de régénération avec $s_{t-1} = 0$, ou
- C-saturée, $x_t = m_t U$, ou
- E-saturée, $p x_t + w m_t^+ + g m_t = E$, ou
- Une période de production nulle, $x_t = 0$

Ceci implique que n'importe quelle période dans le planning qui a un stock entrant positif ($s_{t-1} > 0$) et une quantité de production positive ($x_t > 0$) est soit C-saturée soit E-saturée. La preuve est très similaire à celle de la Propriété 1, et utilise un argument d'échange. Figure 10 illustre ces différents cas.

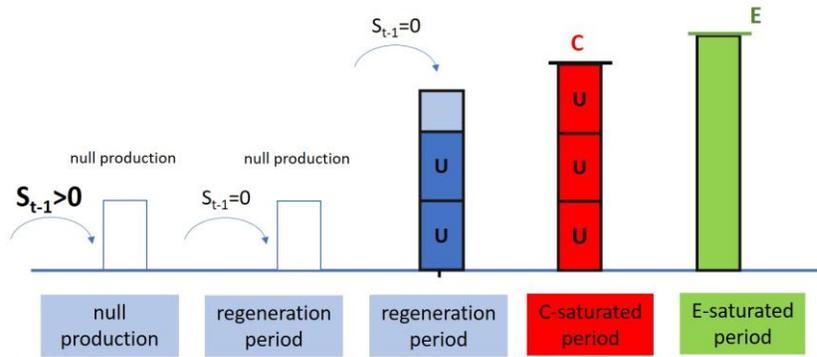


Figure 13. Illustration d'une solution dominante pour energy-LSP avec des paramètres d'énergie stationnaires, dans le cas général.

Le coût optimal associé au sous-plan (u,v) avec le nombre de machines en fonctionnement en début de u étant k et en début de v étant l est donné ci-dessous. La seule différence avec l'algorithme précédent réside dans les paramètres NE et NE^+ . Voir les détails dans notre publication Rapine et al. (2018a).

$$\mathcal{J}(u, k, v, l) = \min\{\gamma_t(k, m) + \mathcal{C}(u+1, m, N_C, N_E, N_E^+, n_E) \mid 0 \leq m \leq M, 0 \leq N_C, N_E, N_E^+ \leq MT, 0 \leq n_E \leq T\}$$

Concernant Rapine et al. (2018b), nous avons étudié le même système de production, mais en faisant des hypothèses supplémentaires. Nous supposons que le fonctionnement des machines (le fait de laisser la machine allumée) ne consomme pas d'énergie, ni ne génère de coût. La consommation énergétique est imputable uniquement au démarrage des machines et à la production des unités. Nous ignorons le coût de setup de production et nous supposons le coût de démarrage des machines stationnaires. Par contre, comparé au cas précédent, la limitation périodique d'énergie peut désormais dépendre du temps. Pour ce cas appelé energy-LSP, nous avons trouvé trois cas polynomiaux, pour lesquels nous avons proposé un algorithme en temps $O(T \log T)$:

- Energy-LSP avec tous les paramètres de consommation énergétique nuls

- Energy-LSP avec seulement le démarrage des machines consommant de l'énergie
- Energy-LSP avec seulement la production des unités consommant de l'énergie

Nous avons démontré que pour ces trois cas, Energy-LSP peut être vu comme un problème d'acquisition de capacité. Cet algorithme très efficace permet également de résoudre des problèmes ayant des fonctions de coût d'acquisition plus complexes : concave, convexe, ou par morceaux pouvant être un mix de morceaux concaves ou convexes. Dans la littérature, Atamtürk and Hochbaum [3] proposent un algorithme en temps $O(T^3)$ pour le cas avec des coûts de production non-spéculatifs, des coûts de sous-traitance linéaire et des coûts d'acquisition de capacité concave. Nous montrons dans notre papier que ce même problème peut être résolu en temps $O(T \log T)$ pour le cas où les coûts de sous-traitance sont supposés infinis. C'est donc une contribution très importante dans la littérature.

Nous continuons nos activités de recherche sur cette thématique qui nous offre plusieurs perspectives de recherche. Actuellement nous travaillons sur energy-LSP avec double source d'énergie : renouvelable et conventionnelle. Nous considérons une firme qui possède ses propres ressources d'énergie verte, supposées gratuites pour sa propre utilisation. Néanmoins, dû aux fluctuations des niveaux d'énergie au cours du temps (photovoltaïque, éolien, etc.), la disponibilité en énergie renouvelable est supposée dépendante du temps. En ce qui concerne l'énergie conventionnelle, son niveau d'approvisionnement est considéré stationnaire, mais payant. L'objectif de notre projet actuel est de décider à quelles périodes utiliser quel niveau de chaque ressource énergétique et comment ajuster les capacités de production à moyen terme. Ce projet est décrit plus en détail dans les perspectives de recherche - Partie III.

Nos principales contributions dans la littérature concernant energy-LSP

Nous sommes les premiers dans la littérature à avoir traité le LSP déterministe et mono produit avec l'ajout des coûts et des contraintes énergétiques. Nous avons identifié ce problème à l'époque où les ressources d'énergie et la consommation énergétique commençaient à être prises en compte dans la planification de la production. Notre algorithme de résolution proposé dans Rapine *et al.* (2018b) est très efficace et permet de résoudre le cas assez général sans faire d'hypothèses particulières sur les paramètres. Nous avons aussi proposé un algorithme en temps $O(T \log T)$ qui permet également de résoudre le CLSP avec l'acquisition de capacité d'une manière très efficace. Ce dernier a été étudié dans la littérature par Atamtürk et Hochbaum (2001) qui avaient proposé un algorithme en temps $O(T^3)$ avec des coûts de sous-traitance. Notre algorithme est beaucoup plus simple à comprendre et à implémenter. En ce qui concerne nos résultats dans Rapine *et al.* (2018a), nous avons réussi à classer quatre problèmes energy-LSP sous différentes hypothèses comme NP-complets. Nous avons proposé deux algorithmes en temps polynomial très efficaces pour des variantes beaucoup plus générales que le cas précédent : désormais nous pouvons résoudre energy-LSP avec des coûts de setup et de fonctionnement de machine positif, également avec l'ajout de consommation énergétique des machines en fonctionnement.

II.1.2. MULTI-ITEM CAPACITATED LOT SIZING PROBLEM

Concernant les systèmes de production, une limitation très naturelle provient de la capacité de production. Cette restriction peut être associée aux équipements qui constituent le système (lignes de production, machines, plans de travail, etc.), à la main d'œuvre disponible (nombre d'opérateurs) ou encore à la quantité disponible des matières premières. Dans un des projets que nous menons avec les collègues de l'université de Porto (Projet "Integrated lot sizing problem with machine replacement activities" avec Bernardo Almada-Lobo, Luis Guimarães et Christophe Rapine), nous considérons un système composé de plusieurs machines identiques et parallèles, ayant chacune une capacité de production limitée, et qui produisent différents types de produits. Les machines concernées sont des fours de fusion destinés à produire la matière de verre, qui sera ensuite transformée en bouteilles de différentes tailles et de différentes couleurs. A chaque changement de couleur un coût de lancement est payé, ce qui est engendré par le nettoyage et la préparation des fours pour la nouvelle couleur. Ceci induit un système à multi produits, multi machines avec des coûts de lancement. Les fours ont une durée de vie limitée (une vingtaine d'années). Au-delà, ils perdent de leur efficacité énergétique, ce qui surenchérit le coût de production. Pour cette raison, les fours doivent être remplacés ou révisés. Cette opération est longue et coûteuse, et entraîne une indisponibilité de la ressource pendant plusieurs semaines.

Notre objectif est de décider sur quelques années (au niveau tactique) quand placer une activité de révision ou de remplacement d'un four, quel four remplacer ou réviser afin de minimiser les coûts associés. Dans ce problème, le nombre de fours et l'ensemble des fours à réviser et à remplacer sont connus, résultant d'une décision stratégique préliminaire. Ayant toutes ces informations disponibles et connaissant les prévisions de demandes pour chaque type de produit, il faut proposer un planning de production respectant ces contraintes et satisfaisant les demandes sans retard ni rupture de stock. Voir Jans et Degraeve (2008) pour une revue de littérature sur la modélisation des problèmes industriels basés sur le LSP et Figure 14 pour la structure du système étudié.

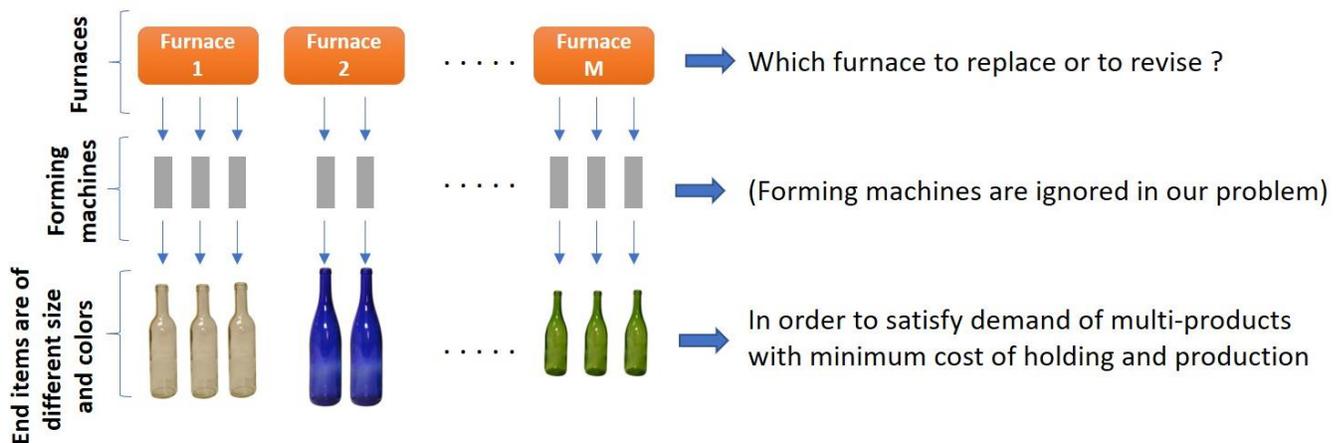


Figure 14. Système de multi-machines avec capacité limitée et demande multi produits.

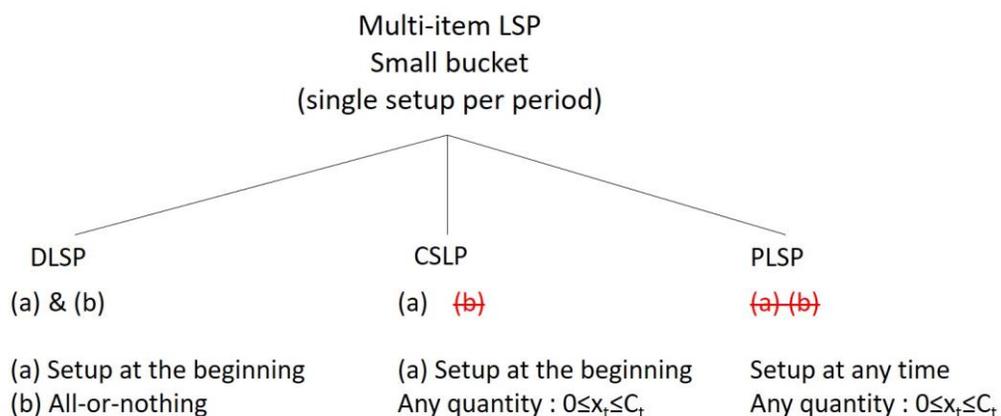
Nous avons étudié les cas suivants pour lesquels nous avons identifié des cas polynomiaux, des cas pseudo-polynomiaux et des cas NP-complets (voir notre publication Díaz-Madroñero *et al.* (2018) pour les détails) :

- Un four – Une couleur
- Multi fours – Une couleur
- Un four – Multi couleurs
- Multi fours – 2 couleurs

Ayant analysé le cas industriel, nous avons modélisé le problème sous les hypothèses suivantes :

- Les périodes correspondent à des mois
- Les coûts impliqués sont le coût de lancement d'un lot d'une même couleur, le coût de stockage unitaire (par tonne produite) et le coût de production
- La capacité d'un four peut varier seulement dans un intervalle très limité, qui nous ramène dans plusieurs cas théoriques que nous avons étudiés à faire l'hypothèse de capacités stationnaires. Dans quelques problèmes néanmoins nous supposons des niveaux C_{\min} et C_{\max} à respecter pour chaque four. C_{\min} est le niveau minimum de production à effectuer, dû aux contraintes physiques du four, et C_{\max} représente la quantité maximale de production à une période donnée.

Nous avons étudié plusieurs cas associés à ce problème multi-item LSP (dans lesquels nous pouvons facilement intégrer la possibilité de demande différée et de vente perdue), voir Figure 15. Dans la littérature du LSP, les modèles dits 'small bucket' sont restreints à un seul setup par période, tandis que les modèles 'big bucket' peuvent contenir plusieurs setups par période. Dans ce projet industriel, une période correspond à un mois et une seule couleur est fabriquée dans un four sur un mois donné. Donc, notre modèle s'inscrit dans la littérature du multi item LSP avec small bucket.



*Figure 15. Illustration of small-bucket problems for multi-item LSP.
(a) single setup per period and only at the beginning (b) all-or-nothing policy*

- DLSP (Discrete Lot Sizing Problem) : Ce modèle repose sur deux hypothèses : (a) Les setups peuvent être réalisés uniquement en début d'une période (b) A chaque période, soit la capacité de production est saturée, soit rien n'est produit (all-or-nothing). En conséquence, seulement un seul type de produit peut être fabriqué sur une période donnée. Nous avons proposé un algorithme en temps polynomial pour un nombre d'items fixés dans le cas de capacité stationnaire.
- CSLP (Continuous Setup Lot Sizing Problem) : Dans ce modèle, les setups ne peuvent également avoir lieu qu'en début de période, mais n'importe quelle quantité peut être produite dans la limite de la capacité. Nous avons également proposé un algorithme en temps polynomial pour un nombre d'items fixés. Voir Vanderbeck (1998) pour plus de détails sur CSLP en comparaison avec DLSP et PLSP.
- PLSP (Proportional Lot sizing and Scheduling Problem) : Ce modèle relâche l'hypothèse des setups en début de période. Un seul setup peut être réalisé par période, mais à n'importe quel instant. La quantité à produire peut aussi être différente de 0 ou de la capacité maximale. Dans la littérature très peu de travaux traitent de ce problème qui a une structure assez compliquée (quantité de production continue !). Nous travaillons donc à l'heure actuelle sur PLSP sous diverses hypothèses.
 - PLSP* : Problème PLSP avec la contrainte all-or-nothing, ce qui veut dire que nous pouvons uniquement produire soit à la capacité maximale soit 0, mais le lancement d'un nouveau lot peut se faire à n'importe quel moment d'une période donnée.
 - PLSP** : Nous interdisons une production nulle, la capacité est saturée à chaque période. Ceci correspond à notre problème industriel initial où il est quasi-impossible d'arrêter la production d'un four de fusion une fois qu'une couleur est lancée. L'investissement initial est tellement grand que les fours sont utilisés à leur maximum capacité en continue. Les seuls arrêts possibles sont dus soit à un changement de couleur soit à une maintenance, révision ou remplacement de ce four.

Actuellement nous étudions le problème PLSP**, étant le cas qui modélise le mieux notre problème industriel initial.

Nos principales contributions dans la littérature de « small-bucket LSP »

Dans la littérature, nous sommes les premiers à avoir proposé un algorithme pour le PLSP avec deux items et plusieurs machines. C'est un résultat très général qui peut être utilisé à la fois par des chercheurs du domaine de l'ordonnancement et du domaine de LSP discret. PLSP est un modèle qui est à la frontière des problèmes de planification en temps continu (e.g. ordonnancement des tâches) et en temps discret (e.g. LSP classique). Nos résultats restent très généraux et ils contribuent dans un domaine très peu étudié dans la littérature. A notre connaissance, il existe à ce jour moins de 5 articles publiés sur le PLSP, le plus vieux datant de 1995 par Drexel et Haase. La complexité théorique de ce problème n'était pas encore connue à ce jour. Dans nos travaux actuels, nous sommes parvenus à prouver la complexité théorique du PLSP, ce qui représente une contribution très importante dans la littérature. Ce modèle peut réussir à décrire des cas réalistes où le changement de série entre deux produits peut se faire en plein milieu d'une période, dans le cas où les

périodes sont assez grandes (comme les semaines, les mois, etc.). Nos collègues Portugais qui ont des collaborations industrielles avec cette usine qui fabrique des bouteilles en verre vont essayer d'implémenter nos algorithmes afin de positionner les périodes de révision des fours à fusion à moyen et long terme.

| | single-item | n fixed | n part of the input |
|------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| DLSP | polynomial $O(TD)$ | polynomial $O(nTD^n)$ | strongly NP-hard |
| CSLP | polynomial $O(T^6)$ | ? | NP-hard CSLP \propto DLSP |
| PLSP | polynomial \equiv CSLP | ? | NP-hard PLSP \propto DLSP |

Figure 16. Notre contribution dans la littérature du PLSP.

Voici deux théorèmes importants que nous venons de démontrer concernant le PLSP**. Ces résultats n'étant pas encore publiés, je ne souhaite pas donner les détails théoriques.

Théorème 6. Il existe un algorithme en temps polynomial $O(T^2)$ pour résoudre le PLSP** à 2 items sur une seule machine. (Ce problème correspond au cas industriel un four – 2 couleurs)

Théorème 7. PLSP** à 2 items et M machines en parallèle peut être résolu à l'optimum par un algorithme en temps polynomial $O(M^3T^3)$. (Ce problème correspond au cas industriel Multi fours – 2 couleurs).

Nous avons également proposé des algorithmes efficaces en programmation dynamique pour les problèmes DLSP et CSLP multi-item avec des capacités de production stationnaires (cas industriel « un four-multi couleurs »). Ci-dessous, l'idée de la récursivité et une petite illustration sont données pour chaque problème.

One furnace-multi color problem (1F-MC)

DLSP with start-up costs and stationary C

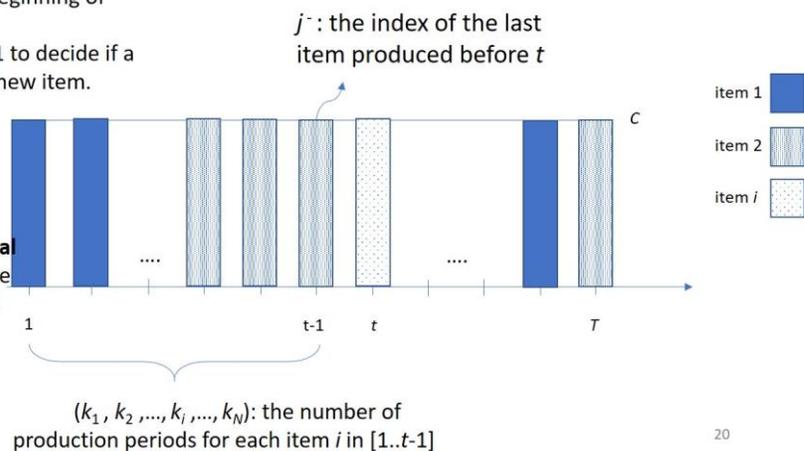
Decomposing the problem into two independent problems over $\{1..t-1\}$ and $\{t..T\}$ if it is known:

- inventory level of each item i at the beginning of period t ,
- and also the last item produced in $t-1$ to decide if a start-up should be made or not for a new item.

$O(NT^{N+1})$ nodes/state vectors $(t, j^-, k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_N)$ to consider.

For a given state, we have $N + 1$ potential successors, depending on which item we decide to produce in the current period

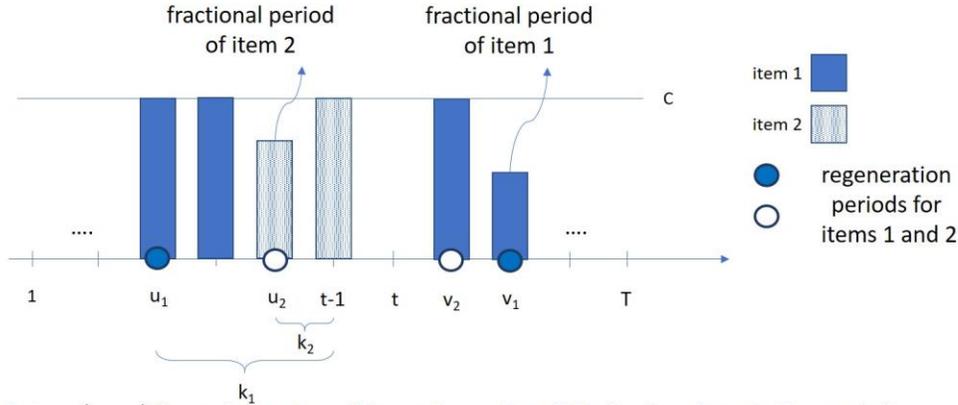
Shortest path problem to solve in an acyclic graph



20

One furnace-multi color problem (1F-MC)

CSLP with start-up costs and stationary C

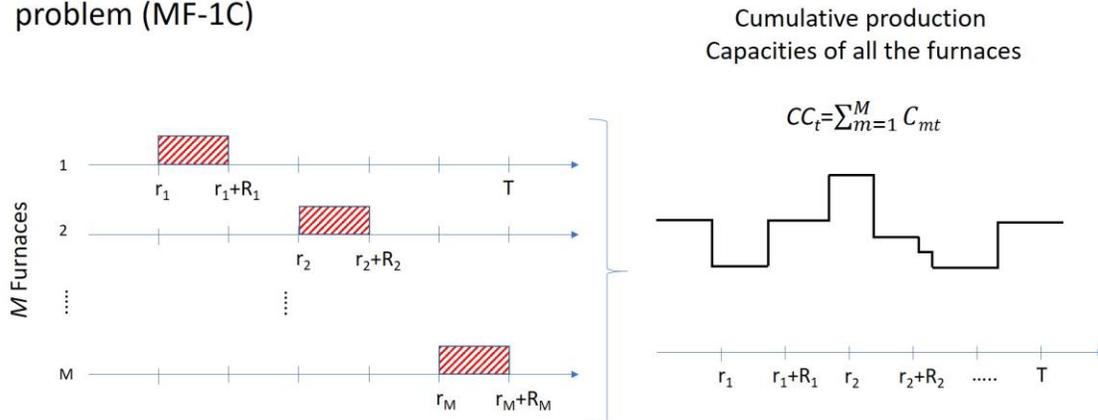


- Subplans (u_i, v_i) for each item i : position and quantity of this fractional production period
- Dominance property: in a subplan there is at most one fractional period, the other periods are either C_{min} -saturated or C_{max} -saturated;
- By enumerating all C_{min} and C_{max} -saturated periods for each item, we can decide the entering inventory level to a given period t in a subplan.

21

Nous avons également proposé une approche de résolution pour le cas multi fours - une couleur, où l'idée est de fixer les dates des révisions sur chaque four et de calculer une capacité cumulée qui nous servira comme une capacité unique sur un four. Ainsi, nous pouvons utiliser la même approche de résolution proposée pour un four – une couleur.

Multi furnace-one color problem (MF-1C)



- There are at most T^M possible schedules of the maintenance activities on M furnaces
- For each possible schedule we solve the previous LP

18

Nous sommes actuellement en train de finaliser un article revue avec tous nos résultats pour le PLSP afin de le soumettre dans les semaines qui viennent.

II.1.3. INVENTORY BOUNDED LOT SIZING PROBLEM

Nous avons mentionné qu'une des limitations de ressource très classique pour le LSP est la capacité de production. Dans cette section, nous allons plutôt considérer des limites sur la capacité de stockage, ce qui est beaucoup moins étudié dans la littérature comparée au CLSP. Pourtant, dans beaucoup de cas industriels, il est difficile d'imaginer un espace de stockage sans aucune limitation de capacité. Surtout si les produits nécessitent des conditions spécifiques de stockage, comme des espaces frigorifiées, des salles sous une certaine pression atmosphérique ou sous certaines normes de stérilisation ou de sécurité. Atamturk et Kucukyavuz (2008) donnent quelques exemples industriels concernant le secteur pharmaceutique et le secteur informatique en data processing où l'espace de stockage utilisée est par défaut limitée à chaque période et génère un coût qui peut être assez important comparé aux autres coûts logistiques. Dans la suite, nous appelons ce problème LSP-IB pour LSP with Inventory Bounding et CLSP-IB si la partie lot sizing subit une restriction de capacité (de production ou d'approvisionnement).

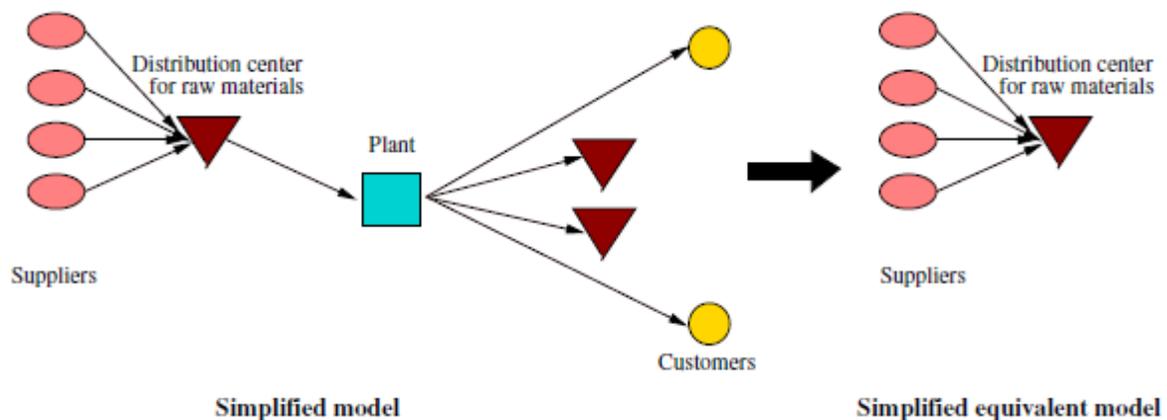


Figure 17. Structure de la chaîne logistique étudiée dans le cadre du projet avec EMI-Rabat. Source : Akbalik et al. (2008).

Une première étude concernant LSP-IB que nous avons menée était dans le cadre d'un projet effectué avec des chercheurs de l'Ecole Mohammedia d'Ingénieurs (Rabat, Maroc). Ce projet était basé sur un cas réel, voir Akbalik et al. (2008)⁹. Il s'agit du problème de l'approvisionnement multi produits d'une usine implantée au Maroc depuis plusieurs fournisseurs internationaux. Voici une petite description du problème traité : Certains fournisseurs approvisionnent directement l'usine et certains préfèrent approvisionner un dépôt central (DC) qui se trouve en Europe. Une fois les matières premières livrées à l'usine, elles sont transformées en produits finis et expédiées en JAT (juste à temps) aux clients finaux. Après une analyse minutieuse du cas industriel, nous avons modélisé ce système en simplifiant certaines parties qui représentaient des coûts négligeables, en faisant des hypothèses réalistes. Nous avons rapidement identifié que ce qui posait le plus de problème était l'approvisionnement multi produits depuis différents fournisseurs répartis géographiquement dans le monde entier (Asie, Europe, US) et qui subissaient justement une forte contrainte de stockage au sein du DC. Nous avons donc réduit notre étude à l'approvisionnement du DC depuis plusieurs fournisseurs, chacun expédiant un seul type de produit en utilisant des véhicules de capacité limitée, capacité dépendant du temps et de l'expéditeur, voir Figure 17.

⁹ A. Akbalik, S. Kebe, B. Penz, N. Sbihi. Exact methods and a heuristic for the optimization of an integrated replenishment-storage planning problem. *Int. Trans. in OR* (2008)

Nous avons étudié deux cas pour ce problème industriel :

- **Le cas sans limitation de stockage dans le DC**

Dans le cas où la capacité de stockage est relâchée, le problème multi-fournisseurs et un DC peut être réduit à N problèmes avec un fournisseur et un DC chacun. Notez que sans limite de capacité de stockage à partager par les items, chaque problème mono-item peut être étudié indépendamment l'un de l'autre. Nous avons démontré que ce problème est NP-complet au sens faible. Pour la preuve de complexité, nous avons utilisé la réduction depuis l'instance de CLSP, montré NP-complet par Florian *et al.* (1980). Nous avons ensuite proposé un programme dynamique pour le résoudre à l'optimum. Nous avons également proposé un PLNE (programme linéaire en nombres entiers) afin de comparer la performance de différentes méthodes de résolution. Notez que ce problème correspond uniquement à une étude théorique menée afin d'identifier les caractéristiques du cas simplifié. Cette démarche nous donne des idées fondées sur des bases plus solides pour résoudre le cas réel, avec une capacité limitée de DC.

- **Le cas où le DC a une capacité limitée**

Lorsque la capacité de stockage est limitée et partagée par les différents produits, nous avons démontré que le problème devient NP-complet au sens fort (voir Akbalik *et al.* (2015b)). Nous allons détailler l'idée de cette preuve de complexité un peu plus loin dans cette section. Nous avons proposé une heuristique basée sur la programmation dynamique (DP). L'idée est d'appeler DP initialement proposé pour le couple (item, DC) pour un espace de stockage précalculé en fonction du volume de demande pour chaque item.

Le problème industriel initial étudié sur la limitation du stockage nous a donné plusieurs pistes intéressantes à creuser sur le terrain théorique. Nous avons donc étudié la structure particulière des solutions dans le cas où la capacité de production et la capacité du stockage sont limitées toutes les deux, sur tout l'horizon. Pour ce premier cas, nous avons tout d'abord analysé le système avec un seul type de produit. Voici la formulation en PLNE de ce problème à double capacité : P pour la capacité de production supposée stationnaire et H_t est pour la capacité de stockage à la période t, pouvant dépendre de la période en question. Les autres variables de décisions et paramètres utilisés sont identiques aux formulations précédentes.

$$\sum_{t=1}^T (f_t y_t + p_t(x_t) + h_t(s_t))$$

respecting the production capacity:

$$0 \leq x_t \leq P y_t \quad \forall t = 1, \dots, T$$

and the storage capacity:

$$0 \leq s_t \leq H_t \quad \forall t = 1, \dots, T$$

with the classical inventory flow conservation:

$$s_t = s_{t-1} + x_t - d_t \quad \forall t = 1, \dots, T$$

$$s_0 = s_T = 0$$

$$x_t, s_t \in \mathbb{R}^+, \quad y_t \in \mathbb{N} \quad \forall t = 1, \dots, T$$

Dans notre papier Akbalik *et al.* (2015a)¹⁰, nous avons donc proposé deux algorithmes efficaces en temps polynomial pour le CLSP-IB pour le cas d'un seul item, voir Tableau 1 pour notre contribution dans la littérature de single-item CLSP.

Tableau 1. Nos résultats pour le CLSP avec capacité constante, avec et sans capacité de stockage. Source : Akbalik *et al.* (2015a).

| Production cost | Holding cost | Single-item CLSP | Single-item CLSP-IB |
|-----------------|--------------|---|-------------------------|
| Concave | Concave | Florian and Klein (1971), $O(T^4)$ | Our study, $O(T^4)$ |
| Concave | Linear | van Hoesel and Wagelmans (1996), $O(T^3)$ | |
| Linear | Linear | Pochet and Wolsey (1993), $O(T^2 \min\{P, T\})$ | Wolsey (2006), $O(T^4)$ |
| Linear (+WW) | Linear | Van Vyve (2007), $O(T^2 \log T)$ | Our study, $O(T^3)$ |

CLSP est démontré NP-difficile en 1980 par Florian *et al.* pour le cas avec des capacités de production dépendant du temps. En 1971 Florian et Klein avait déjà travaillé sur le CLSP mais avec des capacités constantes et des coûts concaves. Les auteurs avaient montré en 1971 qu'un algorithme en temps $O(T^4)$ peut résoudre ce dernier. Dans Akbalik *et al.* (2015a), nous avons établi que même en ajoutant des capacités de stockage pouvant varier dans le temps, nous préservons la même complexité en temps $O(T^4)$ en adaptant l'algorithme initial avec cette nouvelle contrainte. Nous avons également proposé un algorithme encore plus efficace en temps $O(T^3)$ pour des coûts linéaires et ayant des motifs non-spéculatifs. Voici l'idée générale que nous avons utilisée.

Tout est basé sur la décomposition du problème globale en sous-problème. Pour le faire, nous avons dû modifier la définition classique des sous-plans (u,v) en y ajoutant la contrainte de capacité de stockage, en nous inspirant du travail de Hwang et van den Heuvel (2012). Cette nouvelle décomposition va nous assurer de pouvoir calculer le coût de chaque sous-plan efficacement, et une fois que tous les coûts sont connus, il suffira d'exécuter l'algorithme du plus court chemin pour chercher le coût optimal global comme mentionné dans les sections précédentes.

Définition. Une période u est appelée *inventory period* si son stock entrant est soit nul soit saturé jusqu'à la capacité H_t autorisée. Plus précisément :

- Si $s_{u-1}=0$, alors la période u est appelée *regeneration period*
- Si $s_{u-1}=H_{u-1}$, alors la période u est appelée *warehouse period*

Nous appelons une période *production period* si $x_t > 0$ et *fractional* si elle n'est ni 0-production ni à capacité saturée (autrement dit, $P > x_t > 0$). Pour une illustration de cette définition, voir Figure 18.

¹⁰ A. Akbalik, B. Penz and C. Rapine. Capacitated lot sizing problems with inventory bounds. **Annals of Operations Research** (2015a)

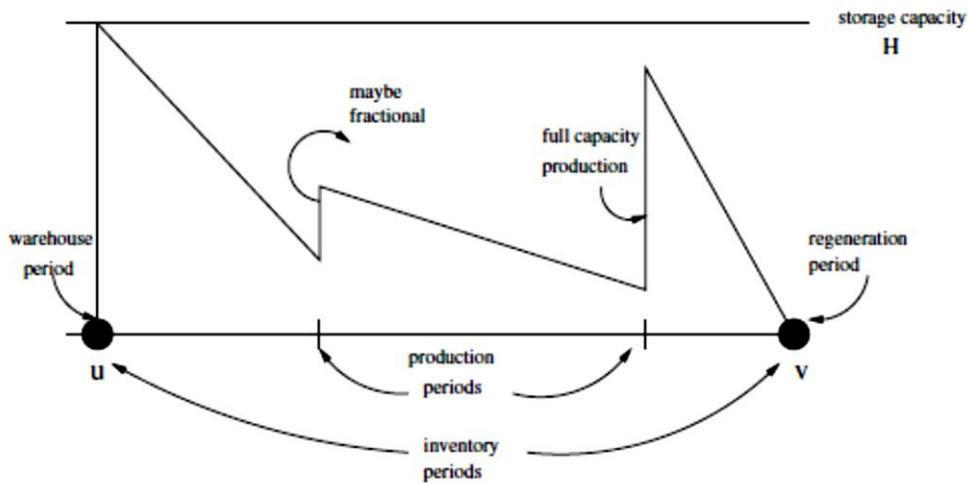


Figure 18. Illustration de différents types de périodes pour CLSP-IB.

Notez que dans notre problème CLSP-IB, chaque sous-plan (u,v) peut avoir quatre configurations possibles : les périodes u et v peuvent être chacune soit *regeneration period* (R) ou *warehouse period* (W). En fonction, les 4 configurations peuvent être décrites comme : (u^R, v^R) , (u^R, v^W) , (u^W, v^R) , (u^W, v^W) , voir Figure 19. L'idée cruciale derrière la connaissance de ces périodes en début et en fin de chaque sous-plan est basée sur l'information du niveau de stock qui en découle. Si on connaît le niveau de stock entrant à u et à v , il devient plus aisé de calculer le niveau de production dans le sous-plan (u,v) .

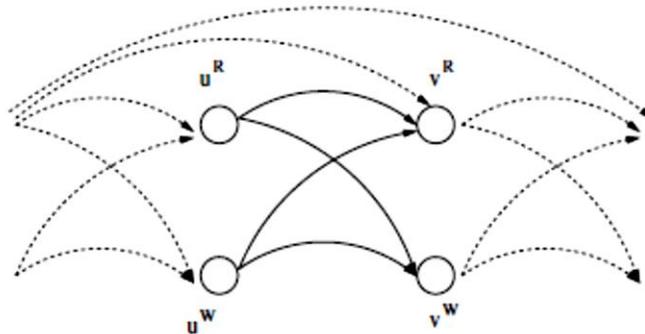


Figure 19. Illustration des 4 sous-plans possibles pour le CLSP-IB.

Supposons que le coût de chaque arc $(u,v)^{R,W}$ soit connu, alors le problème devient uniquement la résolution du plus court chemin en temps $O(T^2)$ en commençant par la période initiale avec 0 stock comme source et en arrivant à la dernière période représentant le puit ayant un niveau de stock nul à la fin. Toutes nos efforts sont donc concentrés sur « Comment résoudre efficacement le problème de planification de production et de stockage dans chaque sous-plan donné ? ».

Pour le CLSP-IB avec des coûts concaves l'idée de notre algorithme en temps $O(T^4)$ est sous forme d'une adaptation de ce qui existe déjà dans la littérature (Florian et Klein, 1971). Par contre pour le cas avec des coûts linéaires et non-spéculatifs, nous avons développé un algorithme original et très efficace. Voici l'idée générale.

Propriété 3. Dans un sous-plan, seulement la première période de production peut être fractionnaire (*fractional period*). La preuve de cette propriété est basée sur la structure des flots dans un réseau. C'est une propriété assez classique utilisée couramment dans la littérature.

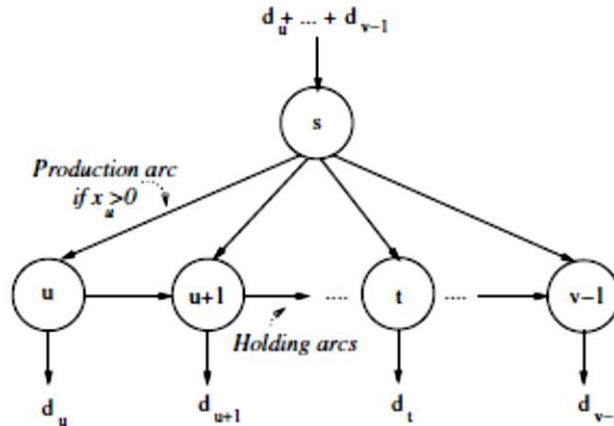


Figure 20. Illustration network flow pour un sous-plan (u,v) donné.

Considérons maintenant le sous-plan (u,v) et recherchons son coût. Suivant la Propriété 3, fixons la première période de production \hat{t} étant fractionnaire dans ce sous-plan (voir Figure 21). Notez qu'avant cette période \hat{t} rien n'est produit entre u et $\hat{t} - 1$. Par définition, nous connaissons exactement combien de produits y'a-t-il en stock en début de u , en fin de $v-1$ (si la période est de type R alors stock nul et si elle est de type W alors le stock est H_t), nous connaissons également la quantité de demande à satisfaire dans un sous-plan étant $D_{u,v-1}$. Selon la Propriété 3, nous savons que si la production ait lieu, alors celle-ci est saturée sur les périodes $\hat{t} + 1 \dots v - 1$. Nous pouvons donc facilement calculer le niveau de production sur la période fractionnaire \hat{t} , avec $x_{\hat{t}} = D_{u,v-1} - KP$. Dans cette formule, K peut aussi être calculé facilement, $K = \lfloor D_{u,v-1}/P \rfloor$. Ceci revient à résoudre le problème DLSP (Discrete Lot Sizing Problem) pour l'intervalle (\hat{t}, v) . Voir Section II.1.2 pour plus de détails sur le DLSP.

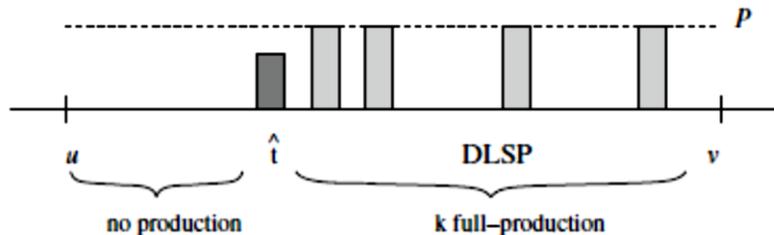


Figure 21. Intervalle du DLSP (Discrete Lot Sizing Problem) à résoudre pour un sous-plan (u,v) donné.

L'originalité de notre approche est la suivante : plutôt que de faire ce calcul pour les périodes u et v données, nous factorisons le calcul en éliminant la période u . Indépendamment de la période u du début du sous-plan, en ayant uniquement l'information de la période finale v , nous calculons via DLSP les périodes de *full-production* sur l'intervalle (\hat{t},v) . Cette approche permet de réduire la complexité algorithmique de notre

formule récursive. Pour les détails de l’algorithme, le lecteur peut se référer à notre publication Akbalik et al. (2015a).

Pour le cas multi-item CLSP-IB, nous avons considéré des machines dédiées à un seul type de produit chacune, et un espace commun où ces différents types de produits sont stockés. Nous avons montré que ce problème est NP-complet au sens fort même pour le cas restreint sans coût de stockage ni coût unitaire de production et avec tous les paramètres de coût et de capacité supposés stationnaires et identiques pour chaque item. La preuve de NP-complétude est basée sur la réduction en temps pseudo-polynomial depuis le problème Exact cover by 3-sets (X3C) à une instance de notre problème multi-item CLSP-IB. Exact cover by 3-sets a été démontrée NP-difficile par Garey et Johnson (1979). Les détails de cette réduction peuvent également être trouvés dans Akbalik et al. (2015a).

Une autre étude que nous avons réalisée avec des capacités de stockage limitées concerne le ULSP-IB multi-item. Dans Akbalik et al. (2015b)¹¹ nous avons montré que ce problème est NP-complet au sens fort même pour le cas restreint avec une capacité de stockage stationnaire, des coûts de stockage nuls et des coûts de setup de production stationnaires. La réduction en temps polynomial est effectuée depuis le problème 3-Partition. Même si les coûts unitaires de production et de stockage sont nuls, le problème reste encore NP-complet pour seulement deux périodes. Nous montrons pour ce dernier problème qu’un algorithme polynomial en temps $O(2^{mT^{(m+1)}})$ peut-être proposé pour un nombre fixé d’items m (ne faisant pas partie de l’instance initiale). Dans le

Tableau 2 nous donnons quelques résultats pour le ULSP-IB mono-produit avec une capacité de stockage dépendant du temps. Notre contribution dans cette publication Akbalik et al. (2015b)¹² est bien pour le ULSP multi-item pour lequel aucune étude théorique n’a été réalisée auparavant dans la littérature.

Tableau 2. Résultats de la littérature pour le ULSP-IB avec capacité de stockage dépendant de temps. Source : Akbalik et al. (2015b).

| Articles | Cost structure | Backlog | Complexity |
|---------------------------------|------------------------|---------|--------------------------|
| Love (1973) | piecewise concave | yes | $\mathcal{O}(T^3)$ |
| Gutiérrez et al. (2007) | concave | yes | $\mathcal{O}(T^3)$ |
| Toczyłowski (1995) | linear | no | $\mathcal{O}(T^2)$ |
| Atamtürk and Küçükyavuz (2008) | linear (+fixed h_t) | no | $\mathcal{O}(T^2)$ |
| Sedeno-Noda et al. (2004) | linear (no f_t) | no | $\mathcal{O}(T \log(T))$ |
| Hwang and van den Heuvel (2012) | concave | yes | $\mathcal{O}(T^2)$ |
| Hwang and van den Heuvel (2012) | linear and WW | yes | $\mathcal{O}(T)$ |

Nos principales contributions dans la littérature de « LSP-IB »

Malgré la multitude de papiers publiés sur le CLSP dans la littérature, il y a très peu d’études qui prennent en compte la capacité de stockage. Notre contribution principale consiste donc en proposition d’algorithmes efficaces et originaux pour différentes variantes de ULSP et CLSP, mono ou multi-items avec l’ajout d’une capacité de stockage. Nous avons identifié des cas NP-difficiles, nous avons fait des preuves pour démontrer la NP-complétude au sens fort, et nous avons clôturé plusieurs questions ouvertes en termes de complexité théorique pour LSP-IB.

¹¹ A. Akbalik, B. Penz and C. Rapine. Multi-item uncapacitated lot sizing problem with inventory bounds. **Optimization Letters (2015b)**

¹² A. Akbalik, B. Penz and C. Rapine. Multi-item uncapacitated lot sizing problem with inventory bounds. **Optimization Letters (2015b)**

PARTIE II.2

LOT SIZING PROBLEM AVEC DIFFERENTS MODES D'APPROVISIONNEMENT

La détermination de la meilleure combinaison de fournisseurs et de modes de transport, l'affectation des commandes à ces couples (fournisseurs, modes de transport) et la recherche d'un contrat d'achat convenant à toutes les parties deviennent des décisions de plus en plus importantes et de plus en plus complexes pour les entreprises. L'approche classique d'optimiser séquentiellement l'approvisionnement puis la production laisse place à une approche intégrée où ces deux fonctions sont optimisées simultanément. Les différentes parties de la chaîne logistique essaient de trouver les meilleures offres en termes de coût, de délai et de qualité tout en réduisant leur risque. Mes travaux de recherche s'inscrivent donc dans le contexte de la réduction de coût et de délai tout en assurant la satisfaction des demandes en respectant les capacités dans les chaînes logistiques composées de divers acteurs. Nous étudions l'impact de différentes structures de coûts et de capacité d'approvisionnement sur la complexité des problèmes intégrés de planification de production, de livraison et de stockage. Avec mes collègues, nous intégrons également différents types de contrats de réservation de capacité au sein du LSP, ce qui représente une nouveauté dans la littérature. Nous sommes les premiers (à notre connaissance) à avoir proposé des modèles discrets de LSP multi-périodes dans le domaine de contrats en intégration avec la planification d'approvisionnement.

Le LSP considérant différents modes d'approvisionnement et différentes structures de coût est la thématique que j'ai étudiée le plus en profondeur tout au long de ma carrière. La recherche de solution optimale et des propriétés structurales liées au LSP ayant une fonction de coût d'approvisionnement par morceaux devient plus compliquée comparé au cas classique (ayant une structure de coût « fixed charge »), voir Figure 22 pour une illustration de ces coûts. A gauche une structure fixed charge et à droite stepwise (ou par morceaux).

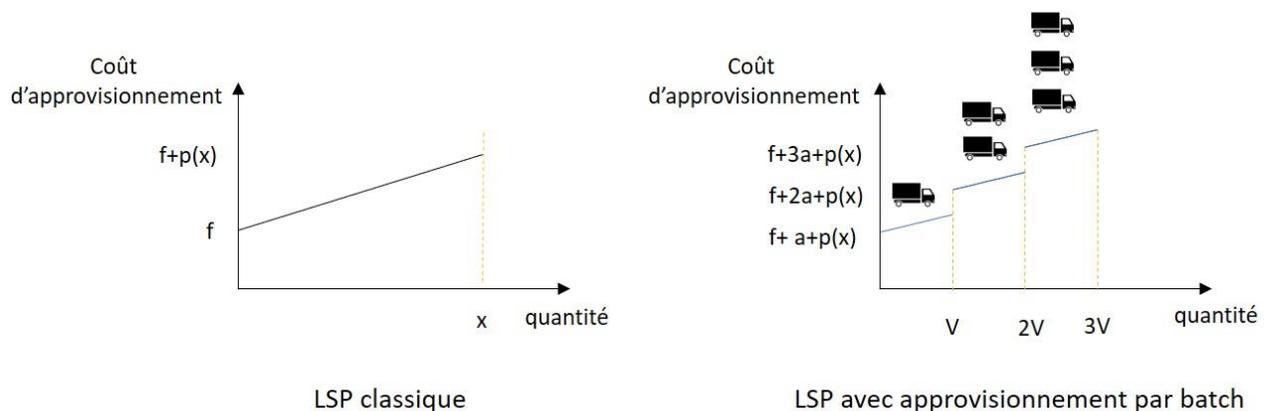


Figure 22. Illustration de coût 'fixed charge' pour le LSP classique (à gauche) et coût par morceaux FTL (à droite).

Reprenons l'exemple de la Figure 6. Lors du passage du ULSP au CLSP, nous avons montré que la propriété ZIO ne fonctionnait plus. Il en est de même pour le ULSP avec approvisionnement par batch, voir Figure 23. Afin de réduire les coûts d'approvisionnement par batch, il est préférable dans la solution optimale de commander 3 batchs à la première période et de stocker une unité jusqu'à la période 3. Notons que le

problème d’approvisionnement avec des véhicules à capacité identique V est équivalent au ULSP avec production par batch (de taille B). Lorsqu’il s’agit d’un problème d’approvisionnement, nous utilisons la notation V pour la capacité du véhicule. Pour un problème de production, nous remplaçons V par B , pour la capacité d’un batch. Pour faciliter la lecture, le LSP avec production par batch (ou approvisionnement par véhicule) est noté LSP-B dans la suite.

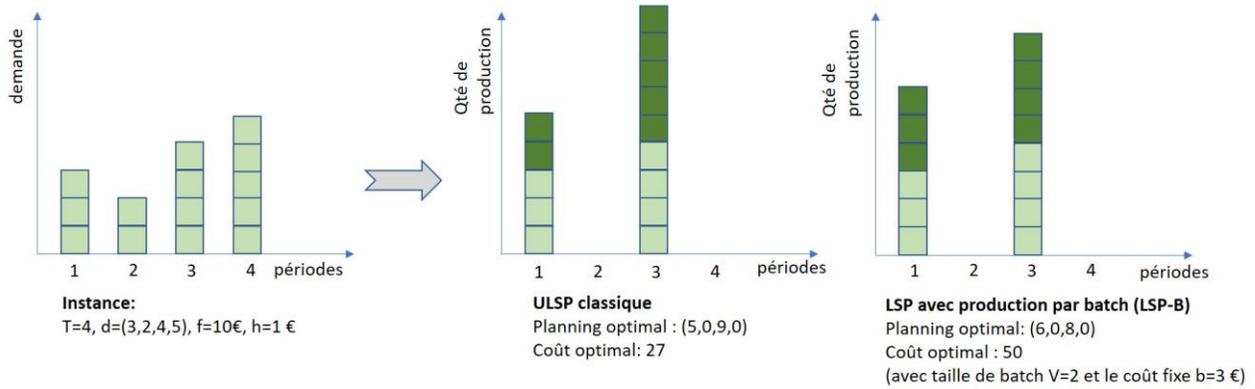


Figure 23. Planning de production optimal pour ULSP et LSP-B.

Comme la propriété ZIO n’est plus dominante, nous utilisons une approche générique, couramment utilisée dans le domaine de LSP afin de découper le problème initial en plusieurs sous-problèmes (qu’on appelle sous plan (u,v)) pour les traiter indépendamment. Un sous plan (u,v) est défini comme l’ensemble des périodes t avec $u \leq t \leq v$, où u et v sont deux points de régénération consécutifs. Rappelons qu’une période est un point de régénération si son stock entrant est nul. Du moment où on arrive à calculer la solution optimale pour chaque sous plan, il suffira d’appliquer un algorithme du plus court chemin pour trouver la solution globale dans le graphe où les nœuds sont les périodes et les arcs correspondent aux sous plans. Voir Figure 24.

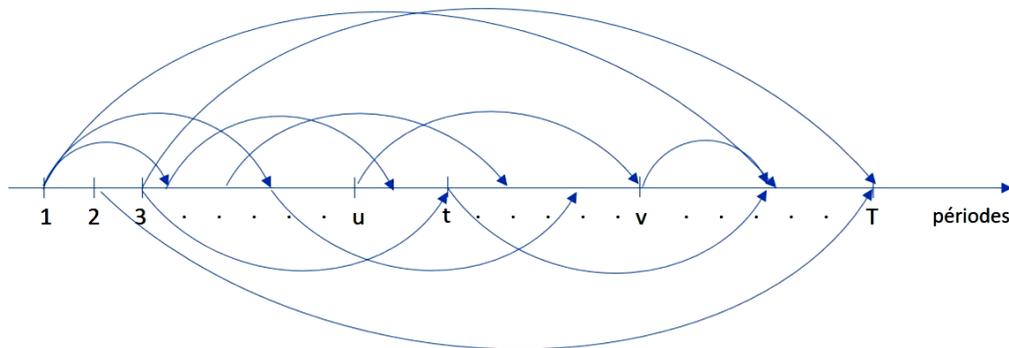


Figure 24. La structure du plus court chemin appliqué au LSP. Un arc entre les nœuds u et v contient le coût du sous plan (u,v) .

Dans la majorité de nos publications, nos efforts sont concentrés sur ‘comment calculer le coût optimal d’un sous plan’, ce qui n’est pas du tout trivial et loin d’être facile. La Figure 25 exhibe la structure d’un sous plan (u,v) pour le CLSP-B ayant une capacité de production stationnaire P et des batchs de taille B . Nous montrons sur cette figure les différentes possibilités pour une période de production dans un sous plan : fractionnaire, P -saturée (la capacité de production est saturée), B -saturée (production en batchs complets et on ne peut plus mettre d’autres batchs sans dépasser la capacité de production), FBS (production par batch complet,

mais sans être B-saturée). Dans la Section II.2.1 nous allons présenter nos résultats les plus importants pour le LSP-B (y inclus ULSP-B et CLSP-B).

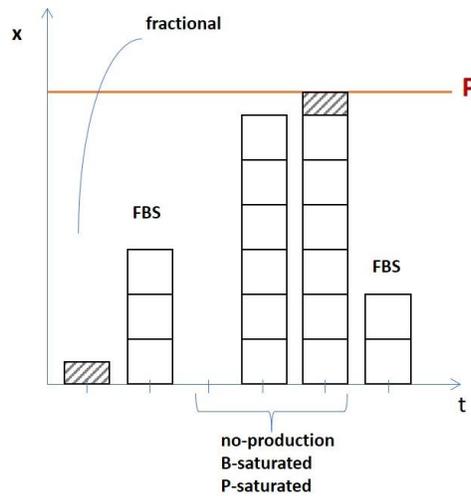


Figure 25. La structure d'un sous plan (u,v) pour le CLSP avec capacité de production et taille de batch constante.
Source : Akbalik et Rapine (2012), OR Letters.

Une autre problématique qui attire l'attention des différents acteurs d'une chaîne logistique est le choix d'un contrat adéquat qui réduit à la fois les risques et qui est gagnant-gagnant pour les parties qui le signent. Nous étudions principalement le contrat de réservation de capacité et le contrat buyback intégrés au LSP. Dans la littérature il y a très peu d'études concernant le LSP intégré avec divers contrats d'achat entre un détaillant et un fournisseur. A notre connaissance, nos travaux dans ce domaine sont les premiers qui ont souligné l'importance de l'intégration des coûts et des contraintes associés à ces contrats au sein de la planification des approvisionnements avec des véhicules ayant une certaine limitation de capacité. La Figure 26 illustre le changement de la structure de coût d'approvisionnement lors d'un contrat de réservation de capacité (CRC) signé entre un détaillant et un fournisseur. Quelques-uns de nos résultats pour ces problèmes intégrés sont présentés dans la Section II.2.2.

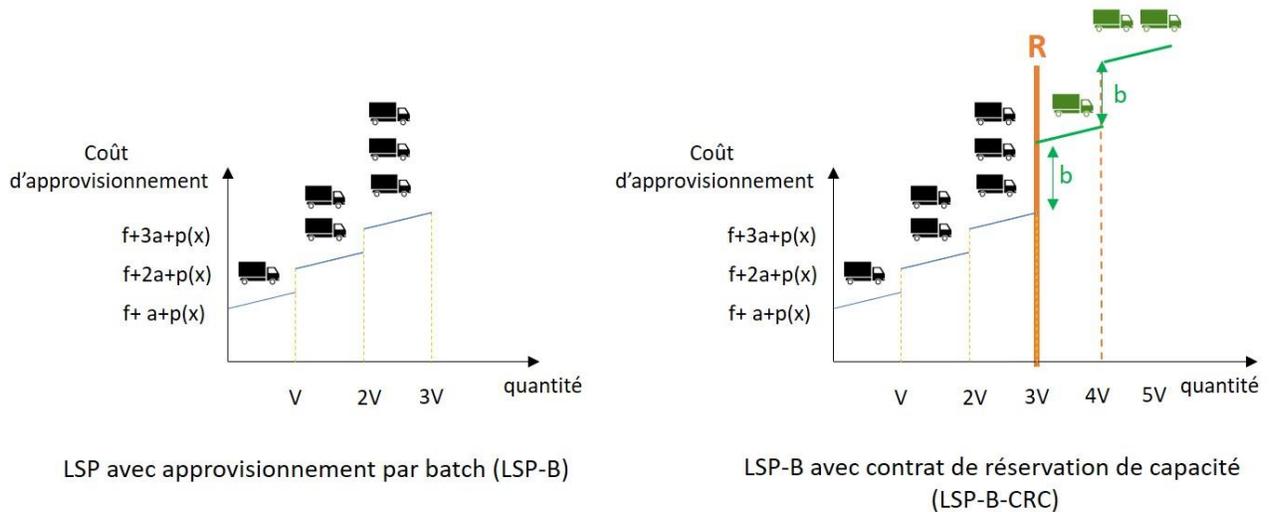


Figure 26. Modification du coût d'approvisionnement du LSP-B après la signature d'un contrat type CRC (Contrat de Réservation de Capacité).

II.2.1 LOT SIZING PROBLEM WITH BATCH REPLENISHMENT

Nous avons commencé nos recherches sur le LSP-B en étudiant le système de production multi machines où chaque machine, de capacité limitée, fabrique un seul type de produit. Les quantités sont produites en batch d'une certaine taille. L'objectif est de déterminer le planning optimal de production de façon à minimiser le coût total de production et de stockage. Les questions importantes qui se posent sont les suivantes : « Quelles machines utiliser et combien de batch produire sur quelle machine à chaque période ? ». Le même modèle s'applique au cas d'un dépôt central approvisionné depuis plusieurs fournisseurs par des véhicules avec des capacités limitées. Voir Figure 7 pour une illustration de ce système et de cette équivalence. Pour ce problème, nous avons proposé un programme dynamique en temps pseudo-polynomial et 3 PLNE. Nous avons également montré son NP-complétude au sens faible. Nous avons proposé des inégalités valides pour renforcer les PLNE et nous avons comparé l'efficacité de toutes ces méthodes. Ces résultats sont publiés dans Akbalik et Penz (2009)¹³.

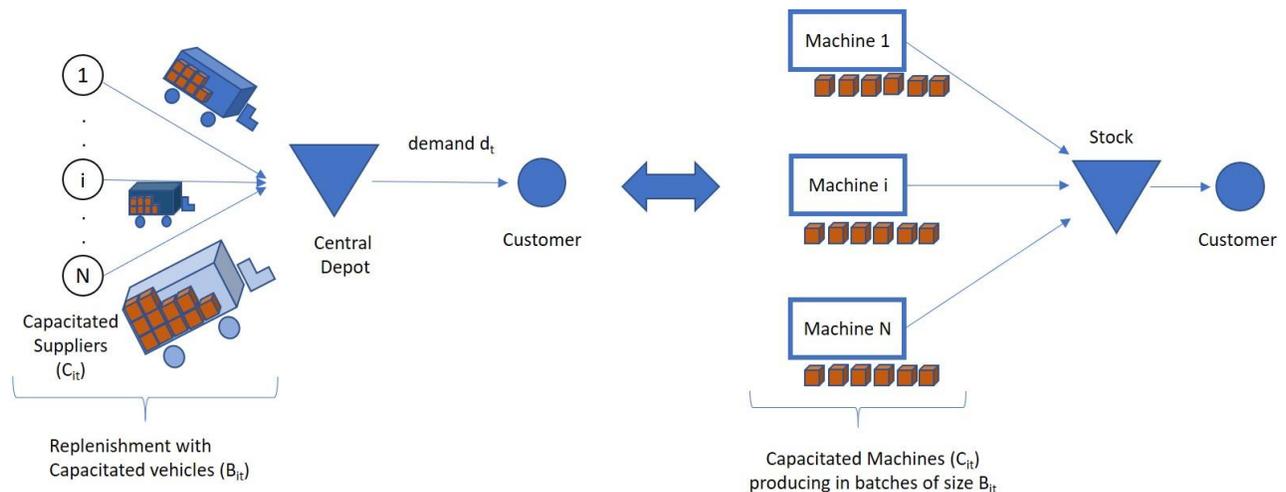


Figure 27. Illustration du système à N machines étudié dans Akbalik et Penz (2009) avec son équivalence au système à N fournisseurs.

Formulations en PLNE et programmation dynamique pseudo-polynomial

Regardons maintenant plus en détails aux diverses contributions dans cette publication. Les 3 formulations en PLNE que nous avons proposées pour cette variante de LSP-B ont été implémentées et toutes testées sur des milliers d'instances numériques, générées aléatoirement de façon à refléter les cas réels au mieux. Après cette étape d'expériences numériques, nous avons remarqué qu'il est très dur de prédire le comportement des PLNE sur diverses instances en termes de temps de résolution. Pour certaines instances l'algorithme de Branch & Bound étant instantané, pour d'autres celui-ci peut mettre plusieurs heures à prouver l'optimalité de la meilleure solution réalisable, et ceci indépendamment de la formulation utilisée. Nous avons donc

¹³ A. Akbalik and B. Penz. Exact methods for single-item capacitated lot sizing problem with alternative machines and piece-wise linear production costs. *International Journal of Production Economics* (2009)

décidé de proposer un algorithme de programmation dynamique qui est lui aussi une méthode exacte, mais son temps de résolution est prédictible en avance. La complexité algorithmique de la formule récursive est facile à calculer et dépend de quelques paramètres : le nombre de périodes, la capacité de production et la quantité des demandes. Notez que pour des instances avec des capacités et des demandes assez grandes, le temps de résolution de la programmation dynamique peut largement dépasser celui des PLNE. Mais pour des petites demandes et de capacité, le temps de résolution du programme dynamique est quasi instantané. Voir Section 4 de notre publication Akbalik et Penz (2009) pour plus de détails sur ces résultats. Nous avons utilisé les 3 formulations suivantes : AGG, FAL et MC afin de les comparer à l'algorithme de la programmation dynamique en termes de temps de résolution et du gap final obtenu. Dans les solveurs commerciaux le gap final % est calculé comme suit : $gap\% = ((\text{Best Integer Solution} - \text{Best Lower Bound}) / \text{Best Integer Solution}) \cdot 100$.

Ci-dessous, nous donnons la modélisation de notre problème suivant les trois formulations en PLNE (tiré de Akbalik et Penz (2009), IJPE. Pour le ULSP, notez que les formulations FAL, MC et SP (Shortest Path Formulation) donnent directement la solution optimale entière lors de la relaxation linéaire. Lorsqu'on ajoute une capacité de production (CLSP) cette propriété n'est plus valide. Il est même impossible de pouvoir utiliser la formulation SP telle quelle, car la propriété ZIO qui n'est plus dominante ne permet plus de décrire les variables de décision associées à chaque arc dans le graphe du plus court chemin. Dans la suite, nous utiliserons d'autres propriétés de dominance qui nous permettront de décomposer le problème en sous-problèmes et de nous servir de l'algorithme du plus court chemin pour trouver la solution optimale.

Paramètres

- N : number of machines,
- T : number of periods in the planning horizon,
- d_t : customers demand in period t (assumed to be integral),
- C_{it} : capacity of machine i in period t (assumed to be integral),
- B_{it} : batch size on machine i in period t (assumed to be integral),
- q_{it} : set-up cost of machine i in period t ,
- f_{it} : fixed cost generated by one batch production on machine i in period t ,
- p_{it} : unit production cost of machine i in period t ,
- h_t : unit inventory cost at the beginning of period t .

Variables de décision

- x_{it} : production quantity on machine i in period t ,
- s_t : inventory level at the beginning of period t ,
- $y_{it} = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{it} > 0, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$
- z_{it} : number of batches launched in period t on machine i .

A note for FAL formulation :

The new decision variable on the production quantity is w_{itu} , which is the quantity to produce on machine i in period t to satisfy demand in period u , with $t \leq u$. We can write the initial decision variable x_{it} as a function of w_{itu}

| Aggregated Formulation (AGG) | Facility Location based Formulation (FAL) |
|--|---|
| $\min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N (q_{it} \cdot y_{it} + f_{it} \cdot z_{it} + p_{it} \cdot x_{it}) + h_t \cdot s_t \right)$ <p>s.t.</p> $\sum_{i=1}^N x_{it} + s_t = s_{t+1} + d_t; \forall t,$ $x_{it} \leq C_{it} \cdot y_{it}; \forall i, \forall t,$ $(AGG) \quad x_{it} \leq B_{it} \cdot z_{it}; \forall i, \forall t,$ $y_{it} \leq z_{it}; \forall i, \forall t,$ $z_{it} \leq \left\lceil \frac{C_{it}}{B_{it}} \right\rceil \cdot y_{it}; \forall i, \forall t,$ $x_{it} \geq 0, \forall i, \forall t; s_t \geq 0, \forall t,$ $y_{it} \in \{0, 1\}; z_{it} \in \mathbb{N}^+; \forall i, \forall t.$ | $\min \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N (q_{it} \cdot y_{it} + f_{it} \cdot z_{it} + p'_{it} \cdot x_{it}) \right),$ <p>s.t.</p> $x_{it} = \sum_{u=t}^T w_{itu}; \forall i, \forall t,$ $w_{itu} \leq \min\{C_{it}, d_u\} \cdot y_{it}; \forall i, \forall t, \forall u,$ $(FAL) \quad x_{it} \leq C_{it} \cdot y_{it}; \forall i, \forall t,$ $x_{it} \leq B_{it} \cdot z_{it}; \forall i, \forall t,$ $\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^u w_{itu} = d_u; \forall u,$ $w_{itu} \geq 0, \forall i, \forall t, \forall u; y_{it} \in \{0, 1\}; z_{it} \in \mathbb{N}^+; \forall i, \forall t.$ |

Multi-Commodity Formulation (MC)

The third formulation is similar to the FAL. It is based on the multi-commodity formulation (MC), where each demand at a given period is considered as a separate commodity. The new decision variables are w_{itu} and s_{tu} , the production quantity in period t to satisfy demand in period u , on machine i , and the storage quantity at the end of period t destined to satisfy demand in period u , respectively. The flow conservation constraint is written for each commodity. The linear relaxation of MC for the classical ULSP also gives an integer optimal solution (see Pochet and Wolsey, 2006)

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^N (q_{it} \cdot y_{it} + f_{it} \cdot z_{it} + p'_{it} \cdot x_{it}) \right), \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^N w_{itu} + s_{t-1,u} = \delta_{tu} \cdot d_u + s_{tu}; 1 \leq t \leq u \leq T \\
 & w_{itu} \leq \min\{C_{it}, d_u\} \cdot y_{it}; \forall i, \forall t, \forall u, \\
 & x_{it} = \sum_{u=t}^T w_{itu}; \forall i, \forall t, \\
 \text{(MC)} \quad & x_{it} \leq C_{it} \cdot y_{it}; \forall i, \forall t, \\
 & x_{it} \leq B_{it} \cdot z_{it}; \forall i, \forall t, \\
 & s_{0t} = 0; 2 \leq t \leq T, \\
 & s_{tt} = 0; 1 \leq t \leq T, \\
 & w_{itu} \geq 0, \forall i, \forall t, \forall u; y_{it} \in \{0, 1\}, \forall i, \forall t; \\
 & z_{it} \in \mathbb{N}^+, \forall i, \forall t; s_{tu} \geq 0; \forall t, \forall u, \\
 & \delta_{tu} = \begin{cases} 1 & \text{if } t = u, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Algorithmes de programmation dynamique polynomiaux

L'étude de ce système à multi-machines (ou multi fournisseurs) avec une structure de coût par morceaux nous a conduit à analyser plus en profondeur le système à une seule machine avec la même structure de coût. Dans notre publication Akbalik et Rapine (2012)¹⁴ nous avons proposé deux algorithmes en temps polynomial pour le problème de CLSP-B : un premier algorithme en temps $O(T^4)$ pour le cas où la capacité de production est multiple de la capacité d'un batch ($P \bmod B=0$), et un deuxième algorithme en temps $O(T^6)$ pour des coûts non-spéculatifs et sans aucune restriction sur la relation entre P et B . Voir le Tableau 3 pour le positionnement de ces résultats dans la littérature.

Tableau 3. Nos résultats pour le CLSP avec une capacité de production et une taille de batch constantes.
Source : Akbalik et Rapine (2012).

| Papers | Cost structures | | | Complexity |
|---------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|------------------|
| | Setup cost | c_t, p_t, h_t | Other assumptions | |
| Van Vyve (2007) | - | ✓ | Backlog | $O(T^3)$ |
| Van Vyve (2007) | - | ✓ | WW costs | $O(T^2 \log(T))$ |
| Van Vyve (2007) | - | ✓ | Backlog + only full batch | $O(T^2)$ |
| Van Vyve (2007) | - | ✓ | Only full batch | $O(T \log(T))$ |
| Akbalik and Rapine (2012) | K_t | ✓ | $R \bmod V = 0$ & WW costs | $O(T^4)$ |
| Akbalik and Rapine (2012) | K_t | ✓ | WW costs | $O(T^6)$ |

Nous pouvons donc citer les trois points suivants comme contribution importante de notre travail publié dans Akbalik et Rapine (2012) :

¹⁴ A. Akbalik and C. Rapine. Polynomial time algorithms for the constant capacitated single-item lot sizing problem with stepwise production cost. **Operations Research Letters** (2012)

- Par rapport aux résultats existants dans la littérature, nous avons ajouté dans notre modèle un paramètre de coût très important et très réaliste : le coût de setup de production. Ce coût était négligé dans les travaux de van Vyve (2007) afin de pouvoir proposer des algorithmes polynomiaux. Nous avons réussi à proposer des algorithmes efficaces et en temps polynomial même après l'ajout de ce coût de setup qui génère des variables binaires et a tendance à compliquer la résolution de nombreux problèmes de LSP. Nous sommes les premiers dans la littérature à avoir proposé des algorithmes polynomiaux et très efficaces pour le CLSP avec capacité stationnaire et ayant une configuration de coût assez complexe avec une fonction par morceaux avec des discontinuités. Voir Tableau 4 pour la performance de notre algorithme général en temps $O(T^6)$ et le PLNE (MILP-mixed integer linear programming formulation).
- Lorsque la capacité est dépendante du temps, le problème devient NP-difficile. Nous avons montré que pour des capacités stationnaires le problème peut être résolu en temps polynomial.
- Notre algorithme général de DP (dynamic programming algorithm) a un temps de résolution extrêmement rapide comparé au PLNE. Voir Tableau 4 pour une comparaison du temps et de gap % final après 5 min pour les deux méthodes.

Tableau 4. Résultats expérimentaux, comparaison entre DP (dynamic programming algorithm) et MILP (PLNE)

Computational results for DP and MILP.

| | Time horizon (T) | | | | |
|---------------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 20 | 50 | 100 | 200 | 400 |
| DP time | <0.01 s | <0.1 s | 0.13 s | 1.5 s | 22.8 s |
| MILP gap at DP completion | 0% | 3.47% | 32.58% | 15.27% | 4.04% |
| MILP gap after 300 s | 0% | 2.3% | 4.23% | 5.63% | 3.97% |

Approche polyédrale

Lors de mes travaux postdoctoraux à CORE (UC Louvain), j'ai travaillé sur le même problème CLSP-B mais en adoptant une approche polyédrale. L'approche polyédrale permet d'accélérer la recherche d'une solution optimale dans un polyèdre donné. Compte tenu de plusieurs millions de solutions réalisables pour un problème de taille réaliste en planification de production, le but est toujours d'aller le plus vite possible pour cibler la solution optimale. Actuellement il y a des centaines de chercheurs en mathématiques appliquées et en informatique, également des ingénieurs de développement qui travaillent dans des boîtes d'optimisation afin de proposer les outils les plus puissants du marché pour résoudre les problèmes d'optimisation modélisés sous formes de PLNE. Ils proposent des inégalités valides, des coupes assez généraux et intéressants qui permettent d'élaguer les parties pas très intéressantes du polyèdre pour accélérer à la fois l'étape de presolving et l'étape de la séparation et d'évaluation. S'il y a encore quelques années nous devrions écrire nos fonctions et nos procédures destinées à ajouter nos inégalités valides sous forme d'algorithme de séparation au sein d'une procédure de Branch and Cut, de nos jours il est devenu très facile d'ajouter des coupes dans une formulation en PLNE. Gurobi (solveur linéaire commercial) nous le permet sans trop nous fatiguer avec ses nouvelles fonctionnalités. Les PLNE qui prenaient plusieurs heures pour trouver un gap% raisonnable il y a 10 ans, donnent la solution optimale instantanément depuis quelques années. Une grande partie de ces avancés est réalisée grâce aux recherches déroulées dans le domaine de l'approche polyédrale.

Dans ce projet, notre objectif était de proposer des inégalités valides pour couper les parties non intéressantes du polyèdre associé au CLSP-B (avec P et B stationnaire). Sous différentes hypothèses restrictives, nous avons montré que certaines de ces inégalités représentent des facettes pour notre polyèdre. Nous avons aussi déterminé l'enveloppe convexe d'un sous ensemble de contraintes de notre problème. C'était un travail extrêmement théorique qui a nécessité un travail acharné d'une année complète, avec plein de jolis résultats. Un de nos résultats importants de ce papier est le suivant : Nous avons proposé « Mixed Flow Cover Inequalities, MFCI » en mixant les deux types d'inégalités valides existantes dans la littérature (Flow Cover et Integer Flow Cover inequalities). Les premières études sur Flow Cover Inequalities datent de Padberg *et al.* (1985) et les premiers résultats sur Integer Flow Cover sont dus à Atamturk (2003). Notre contribution importante dans la littérature était de proposer cette nouvelle classe d'inégalités MFCI en démontrant plusieurs cas où celles-ci représentent des facettes pour le polyèdre de départ. Nous avons fait plusieurs tests numériques qui ont montré l'efficacité de nos nouvelles coupes lors d'une procédure de Branch and Cut. Il est assez difficile de faire les démonstrations dans mon manuscrit, il est préférable pour le lecteur intéressé de retrouver tous ces résultats théoriques dans notre publication Akbalik et Pochet (2009)¹⁵.

Résultats de complexité

Un problème ULSP-B que nous avons étudié considère des tailles de batch pouvant varier au cours du temps. Ceci est dû par exemple à l'utilisation de différentes tailles de véhicules à différentes périodes, ou différentes tailles de palette ou de container sur différents jours ou semaine. Dans la Figure 28, nous donnons quelques résultats de complexité (polynomial ou NP-complet) que nous avons établis pour ce problème. Nos résultats sont publiés dans Akbalik et Rapine (2013)¹⁶. Nous avons donc quatre preuves de complexité de NP-complétude et deux algorithmes polynomiaux pour ce problème (UBLS et ULSP-B représentent le même problème). Nous donnons ci-dessous un aperçu de ces résultats de complexité prouvés dans Akbalik et Rapine (2013). (f_t , k_t , p_t , h_t) représente les coûts de (setup, fixe par batch, production, stockage).

Theorem (NP-hardness of $(-/k_t/-/-)$). Problem UBLS is NP-hard even with null setup costs and null unit procurement and holding costs.

Theorem (NP-hardness of $(-/k_t/p_t/-)$). Problem UBLS is NP-hard even with stationary fixed costs per batch, no setup cost and no holding costs.

Theorem (NP-hardness of $(-/k_t/-/h_t)$). Problem UBLS is NP-hard even with stationary fixed costs per batch, no setup costs and no unit procurement costs.

Theorem (NP-hardness of $(f_t/k_t/-/-)$). Problem UBLS is NP-hard even with stationary fixed cost per batch and null unit procurement and holding costs.

¹⁵ A. Akbalik and Y. Pochet. Valid inequalities for the single-item capacitated lot sizing problem with step-wise costs. **European Journal of Operational Research (2009)**

¹⁶ A. Akbalik and C. Rapine. The single item uncapacitated lot-sizing problem with time-dependent batch sizes: NP-hard and polynomial cases. **European Journal of Operational Research (2013)**

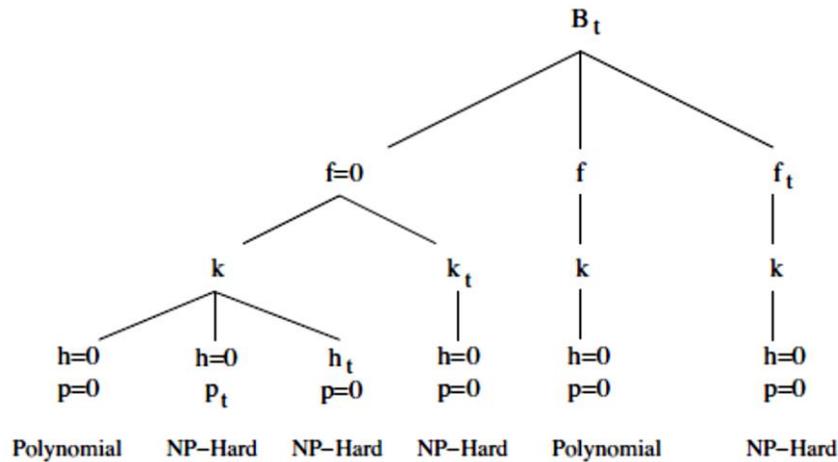


Figure 28. Nos résultats pour ULSP-B avec B_t . Notations utilisées : B_t : taille de batch à la période t , f_t : coût de setup à t , k_t : coût fixe par batch à t , p_t : coût unitaire de production, h_t : coût unitaire de stockage. Source : Akbalik et Rapine (2013).

Dans la littérature, il existait déjà des résultats pour le cas avec la taille de batch B stationnaire (voir Tableau 5), mais nous n’avions pas trouvé de résultats théoriques pour le cas où B_t varie dans le temps. Nos résultats sont très intéressants du point de vue théorique et pratique.

Tableau 5. Classification des travaux sur ULSP-B avec des tailles de batch B stationnaires. Source : Akbalik et Rapine (2013).

| Papers | Problem parameters | | | | Complexity |
|---------------------------|--------------------|------------|-------------------|---------------------------|---------------------|
| | Setup cost | Batch cost | Other costs | Batch size | |
| Lippman (1969) | - | c_t | p_t, h_t | V | $O(T^5)$ |
| Pochet and Wolsey (1993) | - | c_t | p_t, h_t | V | $O(T^2 \min(V, T))$ |
| Lee (1989) | K | c | p, h | V | $O(T^4)$ |
| Li et al. (2004) | K_t | c_t | p_t, h_t and WW | V | $O(T^3)^*$ |
| Li et al. (2004) | K_t | c_t | p_t, h_t | V | $O(T^3 \log(T))^*$ |
| Akbalik and Rapine (2013) | K | c | - | V_t | $O(T^3)$ |
| Akbalik and Rapine (2013) | K_t | c | - | V_t , divisible batches | $O(T^3 \log(T))$ |

Approvisionnement en multimode

Nos derniers résultats sur ce problème concernent ULSP avec approvisionnement en multi modes (ULSP-MMB). Les différents cas réalistes qui sont concernés sont :

- Plusieurs fournisseurs qui approvisionnent chacun un seul type de produit à un dépôt central (DC) et qui utilise chacun un ou plusieurs modes de transport. Ceci est équivalent à considérer un seul fournisseur qui utilise différents modes de transport ayant chacun différente capacité et coût
- Un système de production avec plusieurs machines pouvant faire de la production mono-produit par batch de différente taille.

Nos résultats théoriques positionnés au sein de la littérature sont donnés dans le Tableau 6. Pour plus de détails, voir Akbalik et Rapine (2018)¹⁷. Afin de parvenir à proposer des algorithmes efficaces pour ce problème à multimodes, nous avons utilisé une transformation qui nous a permis de le réduire au problème LSP avec un seul mode. L'idée est la suivante : éclater chaque période t en M sous-périodes, avec chacune représentant un type de mode. Dans ce cas, au lieu de T périodes, dans le nouveau problème équivalent il y aura MT périodes. Le nouveau problème a des tailles de batches qui sont dépendants du temps. La demande positive apparaît alors sur la réelle période, tandis que les périodes fictives générées ont une demande nulle avec un coût de stockage nul entre elles. Cette transformation nous assure l'utilisation de plusieurs méthodes efficaces déjà proposées dans la littérature pour LSP-Bt.

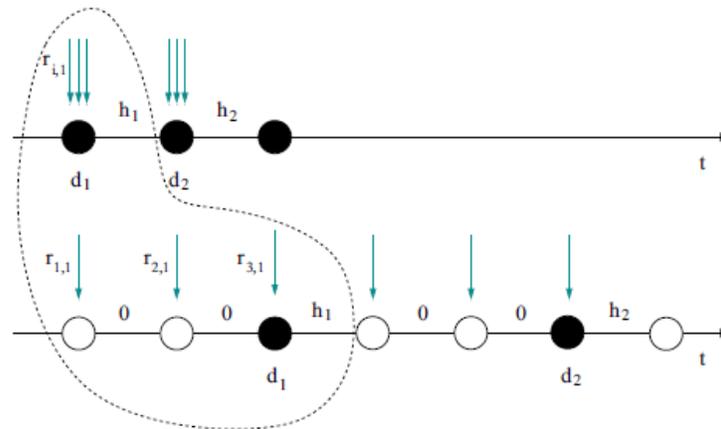


Tableau 6. Etude comparative pour les résultats ULS-MMB. Indexation par i correspond au mode i utilisé, et t à la période en question. Source : Akbalik et Rapine (2018).

| Papers | Parameters | Other hypotheses | Complexity results | |
|----------------------------------|---|-----------------------------|--|-----------------------------|
| This study | k_i | - B_i M | null production cost, $p = 0$ | NP-hard |
| This study | k_i, p_i | - B_i M | unit fixed cost per batch, $k_i = 1$ | NP-hard |
| This study | $f_{\bar{u}}, k_{\bar{u}}, p_{\bar{u}}$ | h_t $B_{\bar{u}}$ M | | FPTAS |
| Jaruphongsa <i>et al.</i> (2005) | f_i, p_i | h_t B_i $M = 2$ | fixed charge cost | $O(T^2)$ |
| This study | $f_{\bar{u}}, p_{\bar{u}}$ | h_t $B_{\bar{u}}$ $M = 2$ | fixed charge cost | $O(T \log(T))$ |
| Jaruphongsa <i>et al.</i> (2005) | f_i, k_i, p_i | h_t B_i $M = 2$ | one supplier: fixed charge cost one supplier: multiple setup cost | $O(T^3)$ |
| Jaruphongsa <i>et al.</i> (2005) | f_i, k_i, p_i | h_t B_i $M = 2$ | divisible batches ($B_1 = \mu B_2$) | pseudo-pol., $O(\mu^2 T^4)$ |
| This study | $f_{\bar{u}}, k_{\bar{u}}, p_{\bar{u}}$ | h_t B_i $M = 2$ | divisible batches ($B_1 = \mu B_2$) | polynomial, $O(T^7)$ |
| Eksioglu (2009) | f_i, p_i | h_t B_i M | fixed charge cost | $O(MT^2)$ |
| This study | $f_{\bar{u}}, p_{\bar{u}}$ | h_t $B_{\bar{u}}$ M | fixed charge cost | $O(MT \log(MT))$ |
| Bai and Xu (2011) | $f_{\bar{u}}, k_{\bar{u}}, p_{\bar{u}}$ | h_t B_i M | incremental quantity discount with only one breakpoint | $O(MT^2)$ |
| Bai and Xu (2011) | $f_{\bar{u}}, k_{\bar{u}}, p_{\bar{u}}$ | h_t B_i M | all unit quantity discount with only one breakpoint | $O(MT^3 + T^2)$ |
| Bai and Xu (2011) | $f_{\bar{u}}, k_{\bar{u}}, p_{\bar{u}}$ | h_t B_i M | incremental quantity discount one mode has multiple setup costs | $O(T^4 + MT)$ |

¹⁷ A. Akbalik, A. and C. Rapine. Lot sizing problem with multi-mode replenishment and batch delivery. **Omega** (2018)

II.2.2 LOT SIZING PROBLEM UNDER CAPACITY RESERVATION CONTRACTS

Une autre problématique très intéressante concerne les produits de haute technologie ayant des cycles de vie court et des demandes incertaines et volatiles. Ces produits demandent également un investissement initial assez significatif, dit 'capital intensive products'. Dans ce contexte, les détaillants et les fournisseurs souhaitent se protéger pour réduire leur risque. Le détaillant peut faire une demande de réservation de capacité auprès du fournisseur, celui-ci réservant alors une partie de sa capacité à un prix avantageux. Si cette capacité réservée est dépassée, le prix devient plus cher (le prix de marché au comptant : spot market cost). Ces types de contrats s'appellent 'Contrat de Réservation de Capacité (CRC)' dans la littérature, voir Wu *et al.* (2005). Voici la fonction du coût $q_t(x_t)$ que nous avons utilisée pour modéliser l'approvisionnement par batch de x_t unités et le changement du prix par batch une fois la capacité réservée est dépassée.

$$q_t(x_t) = \begin{cases} 0 & \text{if } x_t = 0 \\ K_t + a_t \lceil \frac{x_t}{V_t} \rceil + p_t x_t & \text{if } 0 < \lceil \frac{x_t}{V_t} \rceil \leq R_t \\ K_t + a_t R_t + b_t (\lceil \frac{x_t}{V_t} \rceil - R_t) + p_t x_t & \text{if } \lceil \frac{x_t}{V_t} \rceil > R_t \end{cases}$$

Dans cette formule, K_t représente le coût fixe par commande à la période t , a_t et b_t décrivent respectivement les coûts par batch en dessous et au dessus de la capacité réservée R_t (où R_t est décrit en fonction du nombre de batch avec chaque batch ayant une capacité limitée de V_t unités). Pour finir, p_t décrit le coût unitaire d'achat. Notez qu'on considère aussi un coût fixe (et constant) C_0 associé à la signature du contrat CRC.

Nous avons donc étudié le problème LSP-B intégré avec CRC, appelé LSP-BCR dans le reste du document. De nouveau, ce problème d'approvisionnement peut être vu du point de vue de la planification de la production. Le prix de revient est plus avantageux si la production se fait avec les ressources de l'entreprise. Une fois la capacité de l'usine atteinte, les produits manquants sont soit sous-traités, soit il faut avoir recours à des heures supplémentaires et de louer des équipements, ce qui surenchérit les coûts. Les modèles mathématiques dans les deux contextes restent identiques. Voir Figure 29 pour une illustration du système étudié dans le cadre du LSP-BCR avec la fonction du coût d'approvisionnement (replenishment cost $q_t(x_t)$).

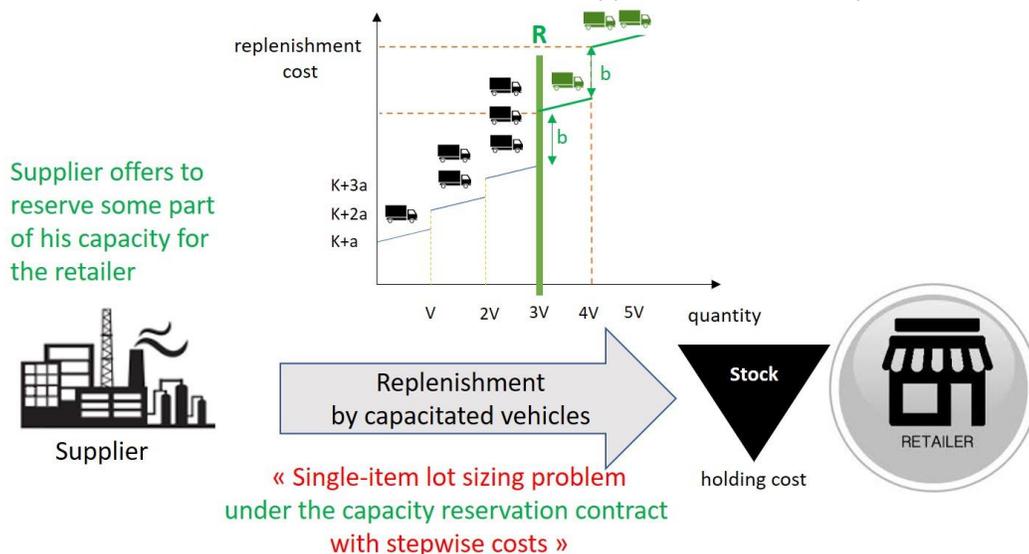


Figure 29. Illustration du système étudié pour le LSP-BCR entre un détaillant et un fournisseur.

Nous donnons ci-dessous la formulation en PLNE pour LSP-BCR. Celle-ci nous permettra de mieux formaliser les contraintes et la fonction objectif à minimiser. A_t et B_t représentent respectivement le nombre de batchs approvisionnés en dessous et au-dessus de la capacité réservée:

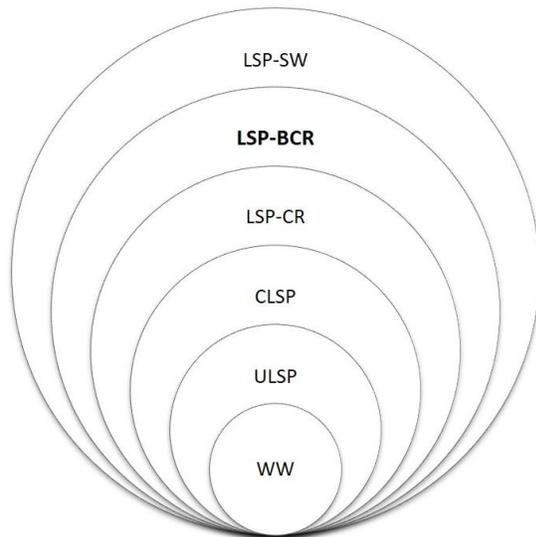
$$\begin{array}{l}
 \text{(LSP-BCR)} \left\{ \begin{array}{l}
 \min \quad C_0 + \sum_{t=1}^T (K_t y_t + a_t A_t + b_t B_t + p_t x_t + h_t s_t) \\
 \text{s.t.} \quad s_{t-1} + x_t = d_t + s_t \quad \forall t = 1, \dots, T \\
 \quad \quad x_t \leq \sum_{i=t}^T d_i y_t \quad \forall t = 1, \dots, T \\
 \quad \quad x_t \leq V_t (A_t + B_t) \quad \forall t = 1, \dots, T \\
 \quad \quad A_t \leq R_t \quad \forall t = 1, \dots, T \\
 \quad \quad x_t, s_t \in \mathbb{R}_+ \quad \forall t = 1, \dots, T \\
 \quad \quad A_t, B_t \in \mathbb{N}, y_t \in \{0, 1\} \quad \forall t = 1, \dots, T
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

Comme nous avons mentionné au tout début de cette Partie II, nous pouvons écrire une formulation équivalente à celle-ci en supprimant les variables de stock s_t (appelé SVS pour sans variable de stock). Cette 2^e formulation, où les variables et les paramètres de stock sont cachés dans les variables et paramètres de production, nous permettra de mieux formaliser nos propriétés de dominance, et surtout rendra les preuves de dominance plus simple à rédiger. Nous remplaçons $s_t = \sum_{i=1}^t (x_i - d_i)$ et nous obtenons $p'_t = (p_t + \sum_{i=t}^T h_i)$. Ces deux formulations ont été implémentées sous Xpress (solveur linéaire). Voir Tableau 10 pour quelques résultats expérimentaux.

$$\begin{array}{l}
 \text{(LSP-BCR')} \left\{ \begin{array}{l}
 \min \quad C_0 + \sum_{t=1}^T (K_t y_t + a_t A_t + b_t B_t + p'_t x_t \\
 \quad \quad - h_t \sum_{i=1}^t d_i) \\
 \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^t x_i \geq \sum_{i=1}^t d_i \quad \forall t = 1, \dots, T - 1 \\
 \quad \quad \sum_{i=1}^T x_i = \sum_{i=1}^T d_i \\
 \quad \quad x_t \leq \sum_{i=t}^T d_i y_t \quad \forall t = 1, \dots, T \\
 \quad \quad x_t \leq V_t (A_t + B_t) \quad \forall t = 1, \dots, T \\
 \quad \quad A_t \leq R_t \quad \forall t = 1, \dots, T \\
 \quad \quad x_t \in \mathbb{R}_+ \quad \forall t = 1, \dots, T \\
 \quad \quad A_t, B_t \in \mathbb{N}, y_t \in \{0, 1\} \quad \forall t = 1, \dots, T
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

Nous avons ensuite analysé minutieusement les variantes plus générales et les variantes plus simplifiées du LSP-BCR. L'objectif de cette démarche est de bien positionner le modèle que nous souhaitons traiter au sein de la littérature, pour être sûr que personne d'autre auparavant ne l'ait étudié sous un autre nom, ou sous d'autres hypothèses. La Figure 30 positionne notre travail dans la littérature de LSP. Nous pouvons facilement remarquer que LSP-BCR est un cas simplifié du LSP-SW, car, pour une période donnée, les pas de la fonction sont considérés réguliers (la taille des véhicules = la taille des pas) et chaque morceau est supposé linéaire. LSP-BCR est plus générale que CLSP car il suffit de faire l'hypothèse du prix d'achat au comptant infiniment cher par rapport aux autres coûts, pour que LSP-BCR devienne CLSP. La variante la plus restrictive nous semble être WW (Wagner & Whitin), qui étaient les premiers à avoir travaillé sur l'hypothèse des coûts non-spéculatifs pour le ULSP. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à notre article Akbalik *et al.* (2017)¹⁸.

¹⁸ A. Akbalik, A. Hadj-Alouane, N. Sauer et H. Ghribi, NP-hard and polynomial cases for the single-item lot sizing problem with batch ordering under capacity reservation contract, **European Journal of Operational Research** (2017)



- WW: Uncapacitated Lot Sizing Problem with Wagner and Whitin cost structure (non-speculative costs)
- ULSP: Uncapacitated Lot Sizing Problem
- CLSP: Capacitated Lot Sizing Problem
- ULSP-B: Uncapacitated Lot Sizing Problem with Batch ordering
- CLSP-B: Capacitated Lot Sizing Problem with Batch ordering
- LSP-CR: LSP under the Capacity Reservation contract
- LSP-BCR: LSP with Batch ordering under the Capacity Reservation contract (our problem)
- LSP-SW: LSP with general stepwise cost structure.

Figure 30. Positionnement du LSP-BCR (LSP avec approvisionnement par batch sous le contrat de réservation de capacité).

Dans le Tableau 7, on peut voir les différentes hypothèses et paramètres considérés pour notre problème, en comparaison avec les autres études existantes dans la littérature. A notre connaissance, notre travail est le seul traitant le LSP-BCR mono-produit dans la littérature.

Tableau 7. Classification des travaux pour LSP-CR et LSP-BCR (LSP avec CRC et approvisionnement par batch à la fois). Atamturk and Hochbaum [AH2001], Lee and Li [LL2013], van Norden and van de Velde [NV2005]. Source: Akbalik et al. (2017).

| Parameters | Classical ordering, LSP-CR | | Batch ordering, LSP-BCR | |
|--------------------------------|----------------------------|---------------|-------------------------|--------------------|
| | AH2001 | LL2013 | NV2005 | This paper |
| Number of items | mono | mono | multi | mono |
| Reserved capacity | constant | constant / ND | constant | constant/arbitrary |
| Batch production/ordering | - | - | yes | yes |
| Batch size | - | - | constant | constant/arbitrary |
| Setup cost | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Unit production cost | ✓ | ✓ | - | ✓ |
| Unit holding cost | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Unit subcontracting/spot price | ✓ | ✓ | - | - |
| Fixed cost per batch a_i | - | - | a | a_i |
| Fixed cost per batch b_i | - | - | b | b_i |

Nos contributions théoriques importantes pour LSP intégré avec contrat de réservation de capacité

Dans la littérature, nous avons trouvé un seul article sur le LSP-BCR : van Norden et van de Velde (2005). Par contre, les auteurs traitent ce problème pour multi-item et proposent une heuristique Lagrangienne qui est une méthode approchée. Nous sommes les premiers dans la littérature à avoir traité LSP-BCR pour mono-

item. Plutôt que de proposer une heuristique, nous avons opté pour analyser la structure du problème profondément afin de proposer des méthodes appropriées en fonction de la complexité de diverses variantes du LSP-BCR. Nous avons pris en compte tous les paramètres du problème qui jouent sur sa complexité théorique. Nous avons balayé toutes les configurations et combinaisons possibles des divers coûts et capacités, et en fonction, nous avons proposé des méthodes exactes appropriées. Nous avons ainsi identifié la frontière entre les variantes du LSP-BCR étant NP-difficiles et celles pouvant être résolues en temps polynomial. Voir Tableau 8 pour tous les résultats polynomiaux et Tableau 9 pour les résultats d'NP-complétude proposés dans notre article Akbalik *et al.* (2017) EJOR.

Tableau 8. Algorithmes en temps polynomial proposés dans Akbalik *et al.* (2017) EJOR en comparaison avec la littérature.

| K_t | a_t | b_t | p'_t | R_t | V_t | Complexity results | From |
|-------|-------|-----------|--------|-------|-------|----------------------------|--|
| - | a_t | b_t | p'_t | R_t | V | $O(T^2 \log(T))$ | Reduction to the case in Van Vyve (2007) |
| - | a_t | b_t | p' | R_t | V | $O(T \log(T))$ | This paper |
| K | a | $+\infty$ | - | R_t | V | $O(T \log(T))$ | This paper |
| K_t | a | $+\infty$ | - | R | V | $O(T \log(T))$ | This paper |
| K_t | a_t | $+\infty$ | p'_t | R | V | $O(T^4)$, $R \bmod V = 0$ | Proposed in Akbalik and Rapine (2012) |
| K_t | a_t | $+\infty$ | p'_t | R | V | $O(T^6)$ | Proposed in Akbalik and Rapine (2012) |

Tableau 9. Résultats de NP-complétude proposé dans Akbalik *et al.* (2017) EJOR.

| K_t | a_t | b_t | p'_t | R_t | V_t | Complexity results |
|-------|-----------|-----------|--------|-----------|-------|--------------------|
| K | a_t | $+\infty$ | - | R_t | V | NP-hard |
| K_t | - | - | - | R_t | V | NP-hard |
| K_t | - | b | - | - | V_t | NP-hard |
| K_t | $+\infty$ | b | - | $+\infty$ | V_t | NP-hard |
| - | - | b_t | - | - | V_t | NP-hard |
| - | $+\infty$ | b_t | - | $+\infty$ | V_t | NP-hard |

Pour donner une idée aux lecteurs sur la façon dont nous avons procédé, voici une brève explication. Pour le cas sans coût fixe de commande (K_t), nous avons fait la transformation suivante afin de rendre le problème plus facile à résoudre (voir Figure 31). Les périodes sont dédoublées : périodes impaires jouent le rôle des approvisionnements en dessous de la capacité R_t avec le coût a_t et les périodes paires sont au-delà de cette capacité, avec le coût b_t . La même idée de transformation a été utilisée dans Akbalik et Rapine (2013) et Helmrich *et al.* (2015). Avec cette transformation, il est maintenant possible d'utiliser les méthodes efficaces. Nous avons aussi étudié le cas avec un coût fixe de commande.

Un autre résultat théorique très important que nous avons proposé dans cet article consiste en l'établissement de l'existence d'un FPTAS (Fully Polynomial Time Approximation Scheme) pour le LSP-BCR. Brièvement, FPTAS est une collection d'algorithmes d'approximation tel que, pour n'importe quel $\varepsilon > 0$, le problème peut être approximé avec une garantie de performance de $1 + \varepsilon$, en temps polynomial en la taille de l'instance et en la valeur de $1/\varepsilon$.

Dans la littérature, van Hoesel et Wagelmans (2001) sont les premiers à avoir proposé des résultats de FPTAS pour le CLSP mono-produit. Les auteurs font une hypothèse forte sur le nombre de pièces dans les fonctions de coût de production (ou stockage) : ils supposent ce nombre polynomialement borné en la taille de l'instance du problème. Mauvaise nouvelle : la fonction de coût du LSP-BCR n'est malheureusement pas

polynomialement borné, et dépend fortement de la taille des demandes. Bonne nouvelle : nous avons trouvé d'autres résultats de FPTAS dans la littérature pour des structures de coûts monotones. Nous avons montré que les trois conditions données par Ng *et al.* (2010) sont satisfaites par le LSP-BCR, donc nous l'avons classée parmi les problèmes NP-complets ayant un FPTAS.

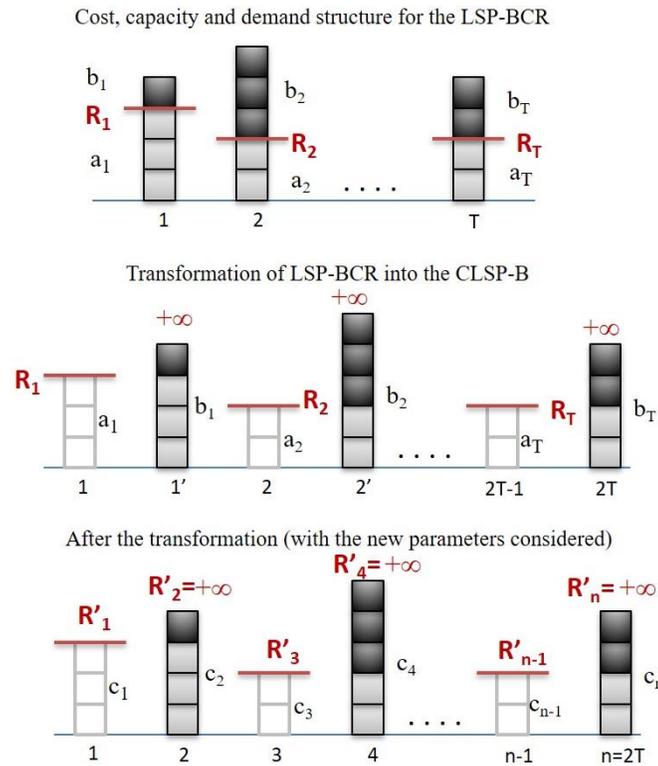


Figure 31. Transformation d'une instance d'un problème LSP-BCR à une instance du problème CLSP-B. Source : Akbalik *et al.* (2017).

A part nos nombreux résultats théoriques pour LSP-BCR, nous avons également implémenté les formulations en PLNE sur le solveur linéaire Xpress et nous avons codé l'algorithme de programmation dynamique pseudo-polynomial pour le cas général sous Java. Nous avons comparé les deux méthodes exactes (Branch & Bound classique du solveur) et le DP en termes de temps de résolution et la proximité à la solution optimale pour le PLNE (MILP) au bout de 5 minutes d'exécution. Pour les commentaires détaillés, voir Akbalik *et al.* (2017). Nous observons que le DP reste très efficace et même pour des instances larges ($T=200$ et demande moyenne de 100, son temps d'exécution est une dizaine de minutes, tandis que le MILP a un gap% positif).

Tableau 10. Résultats expérimentaux pour LSP-BCR. Comparaison du DP (dynamic program) et du MILP (PLNE).

| | $\bar{d} = 30$ | | $\bar{d} = 100$ | | | $\bar{d} = 200$ | |
|--------------------------------------|----------------|----------|-----------------|-----------|-----------|-----------------|-----------|
| | $T = 20$ | $T = 50$ | $T = 50$ | $T = 100$ | $T = 200$ | $T = 100$ | $T = 150$ |
| DP time (seconds) | 0.07 | 1 | 10 | 80 | 652 | 328 | 1187 |
| MILP time (seconds) | 0.1 | 2 | > 300 | 0.3 | > 300 | > 300 | 0.1 |
| MILP gap at DP completion (percent) | 0 | 0 | 0.09 | 0 | 0.02 | 0.01 | 0 |
| MILP gap after 300 seconds (percent) | 0 | 0 | 0.09 | 0 | 0.02 | 0.01 | 0 |

Contrat Buyback intégré avec le LSP

Un autre travail que nous avons effectué très récemment sur l'intégration des contraintes et des coûts associés aux contrats buyback au sein du LSP-B peut être trouvé dans Farhat *et al.* (2019)¹⁹. Dans la suite, ce problème LSP-B intégré avec le contrat buyback est appelé LSP-BB. Contrat buyback est un type de contrat spécial de CRC. Le détaillant a le droit de retourner au fournisseur jusqu'à un certain pourcentage des produits qu'il s'est fait approvisionner depuis ce même fournisseur. Chaque unité retournée ramène un prix de revient au détaillant, et ce prix est considéré moins élevé que le prix d'achat initial afin d'éviter toute spéculation. Voir Figure 32 pour une illustration du système étudié entre deux acteurs.

Les applications du contrat buyback sont diverses chez les industriels et dans la littérature, (voir Pasternack (1985) et Hou *et al.* (2010) pour plus de détails) :

- Produits avec un cycle de vie court (produit alimentaire, produits cuits, produits pharmaceutiques et cosmétiques)
- Produits avec un risque d'obsolescence (journaux, magazines, produits de haute technologie, appareils électroniques, etc.)
- Produits avec une demande saturée rapidement (livres, DVD, CD, etc.)

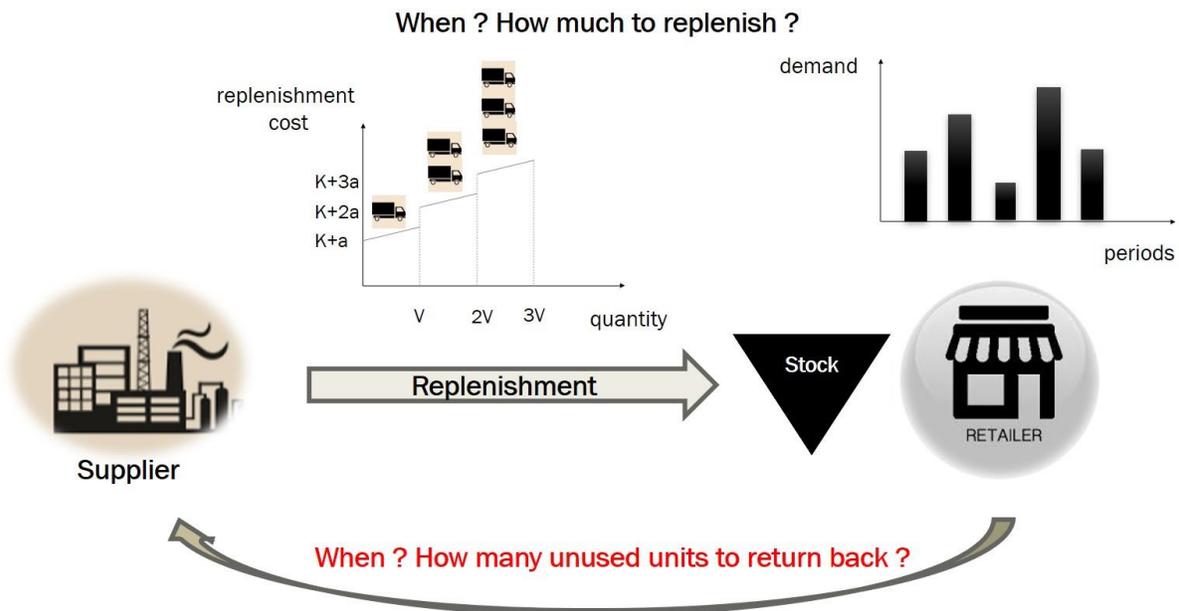


Figure 32. Structure du système étudié dans le cadre du LSP-BB (buyback et production par batch intégrés au LSP)

Dans la littérature, c'est la première fois que le contrat buyback a été intégré au sein du LSP à notre connaissance. La plupart des travaux existants dans la littérature sur le contrat buyback concerne le modèle continu (type EOQ modifié) ou alors des demandes incertaines dans les cas stochastiques. Il s'agit d'une

¹⁹ M. Farhat, A. Akbalik, N. Sauer, A. Hadj-Alouane, Lot sizing problem with batch ordering under periodic buyback contract and lost sales, *International Journal of Production Economics* (2019)

seule période (souvent considéré comme une saison de vente) où les quantités optimales d'achat sont calculées pour le début de cette unique période. Lorsqu'il s'agit d'une demande stochastique rien n'est simple même pour le cas d'une seule période. A terme, notre objectif est aussi d'essayer d'intégrer nos approches de résolution efficaces proposées pour le cas déterministe au sein d'une approche « arbre de scénario dans le cadre de la programmation stochastique ». Notre positionnement dans la littérature se trouve dans l'intersection du LSP-B avec et sans lost sales (ventes perdues) avec contrat de réservation de capacité (buyback plus particulièrement), voir Figure 33 prise de la thèse de Farhat (2019)²⁰. Pour les références complètes citées ci-dessous, le lecteur peut se référer au manuscrit de thèse de Farhat (2019).

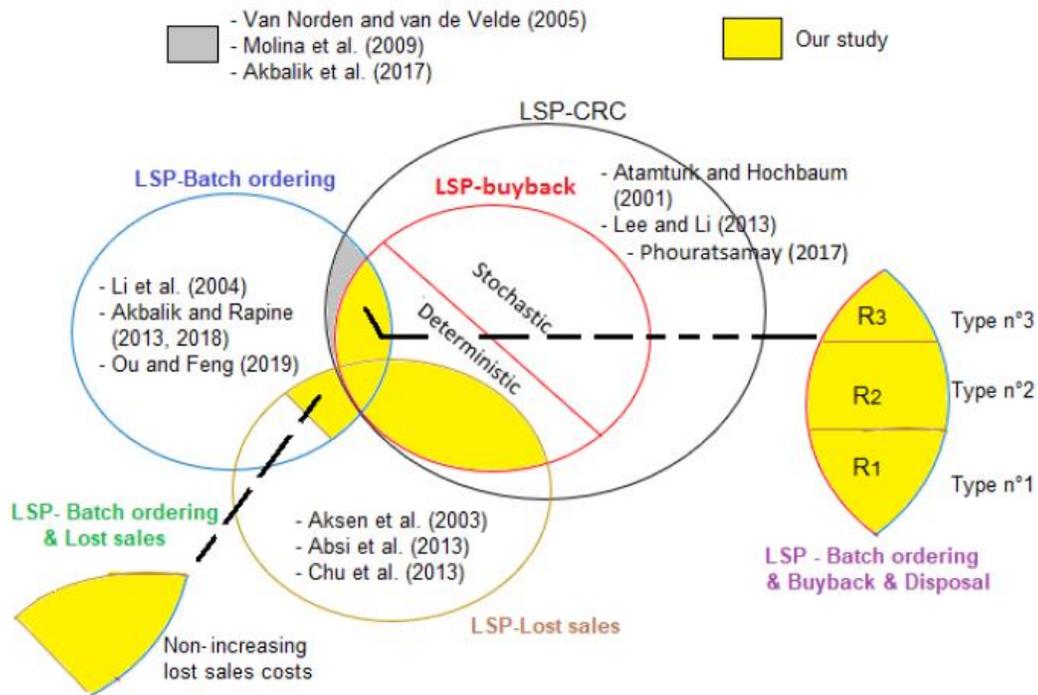


Figure 33. Positionnement de notre problème LSP-BB dans la littérature. Source : Manuscrit de thèse de Farhat (2019).

Dans sa thèse de doctorat, Mme Farhat a étudié différentes extensions de LSP-BB (voir Figure 34) sous diverses hypothèses, pour lesquels les algorithmes en temps polynomial et des formulations mathématiques en PLNE ont été proposés. Notez que LSP-BB considéré dans ce travail de thèse est une planification d'approvisionnement avec des véhicules ayant une certaine capacité, sur multi-périodes, pour un seul type de produit, dans le cas déterministe. Le but est d'intégrer différents types de contrat buyback au sein des décisions d'approvisionnement sur un horizon fini.

²⁰ Farhat, M., 2019. *Batch replenishment planning under capacity reservation contract*, **Ph.D manuscript**: Université de Lorraine & Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.

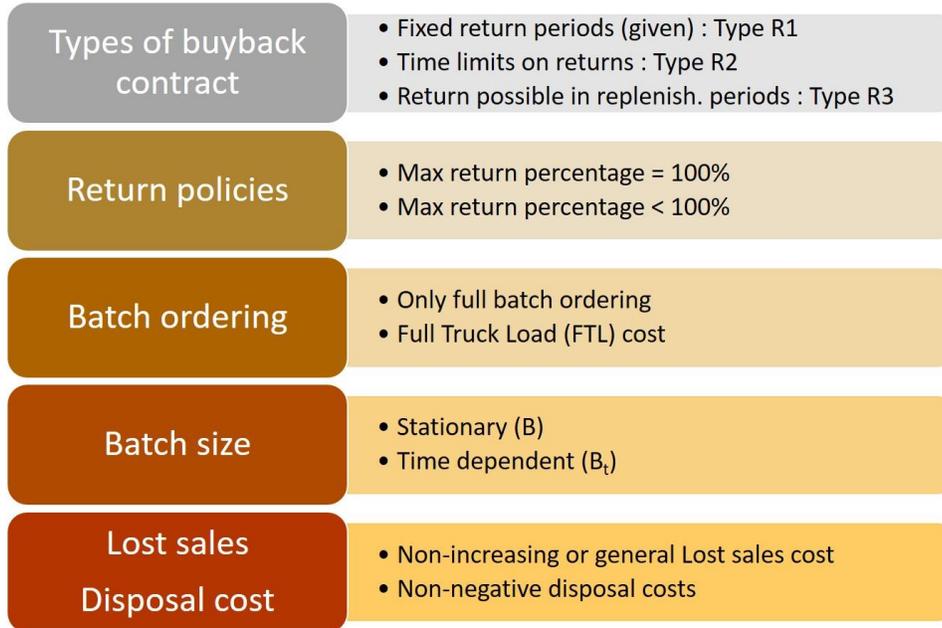


Figure 34. Différentes extensions du LSP-B avec contrat buyback étudiées par M. Farhat dans sa thèse de doctorat (2019).

Pour différents résultats théoriques proposés par Farhat voir Tableau 11, source : Ph.D manuscript, Farhat (2009), Université de Lorraine.

Tableau 11. Résultats théoriques des travaux de thèse de doctorat de Farhat (2019). [1] : Beasley et Christofides (1989), D: Décroissant, G ; Général, P : Positif, OFB : only full batch, FTL : Full Truck Load, V : vehicle capacity, w : périodicité des retours

| Buyback forms | Return policies | | Different assumptions | | | | | | Complexity | |
|---------------------|-----------------|---------|-----------------------|-----|------------|-------|------------------|---------|------------|-------------------|
| | | | Batch ordering | | Batch size | | Lost sales costs | | | Disposal quantity |
| | | | OFB | FTL | V | V_t | NI | General | | NN |
| LSP-BR ₁ | $\rho = 1$ | $w = 1$ | × | | | × | | | | $O(T)$ |
| | | | | × | | × | | | | $O(T)$ |
| | | × | | | × | | × | | | $O(T)$ |
| | | | × | | × | | × | | | $O(T)$ |
| | $w > 1$ | × | | | × | | | | | $O(Tw)$ |
| | | | × | | × | | | | | $O(Tw^3)$ |
| $\rho < 1$ | w_i | × | | | × | | | | | $O(Tw^3)$ |
| | | | × | | × | | × | | | $O(Tw^3)$ |
| | | | × | | × | | | × | | $O(T^4)$ |
| | | | × | | × | | | × | | $O(T^5)$ |
| LSP-BR ₂ | | | × | | × | | | × | | $O(T^5)$ |
| | | | × | | × | | | × | | [1] |
| LSP-BR ₃ | | | × | | × | | | × | | $O(T^5)$ |
| | | | × | | × | | | × | | [1] |

PARTIE II. 3

FLEET SIZING & VEHICLE ROUTING PROBLEM

Dans mes travaux concernant le LSP, j'ai toujours considéré des livraisons directes depuis les fournisseurs ou des dépôts vers un producteur ou vers un dépôt central. Ceci a un impact direct sur la structure du coût d'approvisionnement la rendant coût par morceaux, ce qui induit une difficulté de résolution comparé à la structure classique de « fixed charge cost ». Dans les sections précédentes j'ai présenté nos résultats pour le LSP couplé avec approvisionnement direct par batch (par véhicule, palette, conteneur, etc.). Lorsqu'il s'agit des livraisons directes, une flexibilité dans le choix de la date de livraison chez les clients peut aider à réduire les coûts d'approvisionnement. Dans notre travail publié dans Akbalik et Penz (2011)²¹, nous avons considéré un système composé d'un détaillant ayant un espace de stockage et un producteur (également avec un niveau de stockage) qui livre ce détaillant. Nous avons comparé deux stratégies de livraison : directe ou dans une fenêtre de temps. Nous avons d'abord montré que ces deux problèmes sont NP-complets. Nous avons ensuite proposé une formulation en PLNE et un programme dynamique pseudo-polynomial pour chaque système. Nous avons ensuite comparé les coûts totaux, le nombre de véhicules utilisés et la stratégie de stockage pour diverses instances, en modifiant la taille de la fenêtre de temps, la longueur de l'horizon de planning et les coûts.

Lorsque les décisions de tournées de véhicules (Vehicle Routing Problem, VRP) sont intégrées au sein du LSP, ceci conduit à considérer des modèles de PRP (Production Routing Problem), voir Adulyasak *et al.* (2015) pour une revue littérature. Dans le PRP, le producteur doit livrer les clients, doit décider combien produire chaque période, combien stocker dans son usine et combien livrer à quels clients à une période donnée, tout en minimisant le coût total de production, de stockage dans l'usine et chez les clients, également les coûts de tournées de véhicules. Le LSP qui est déjà difficile avec une capacité de production (CLSP) devient alors encore plus dur à résoudre avec l'ajout des contraintes de type VRP. Lorsque le VRP est intégré avec la gestion de stock chez les clients, le problème est nommé IRP (Inventory Routing Problem, voir Coelho *et al.* (2014)). Dans IRP il n'y a pas le concept de la gestion de production comme dans PRP. Le but de l'IRP est de optimiser simultanément les tournées des véhicules sur multi-périodes tout en minimisant les coûts de stockage chez tous les clients servis et les coûts de transport totaux.

Dimensionnement de flottes de véhicules hétérogènes pour un distributeur de meubles

Avant d'attaquer ces types de problèmes intégrés (type IRP, PRP) qui restent assez complexes, pour lesquels nous pouvons juste espérer proposer des méthodes de résolution toutes prêtes comme métaheuristiques, relaxations, décompositions, nous avons préféré commencer par étudier le VRP et le problème de dimensionnement de flottes de véhicules afin de mieux comprendre la structure de ces problèmes et ce qui les rend aussi durs à résoudre. Le premier problème en gestion de transport que j'ai étudié vient d'un cas industriel que nous avons traité avec un groupe d'étudiants de 4^e année d'école d'ingénieur (TOBB ETU) avec K. Ertogral. Un grand prestataire logistique de meubles détient un dépôt central (DC) où il stock plusieurs types de meubles et de produits ménagères. Ce DC approvisionne les petits détaillants (D), chez qui les clients (C) viennent pour choisir leur meuble, et les commandes sont livrés par des transporteurs locaux que chaque

²¹ A. Akbalik and B. Penz. Comparison of just-in-time and time window delivery policies for a single-item capacitated lot sizing problem. *International Journal of Production Research* (2011)

détaillant gère à sa façon. Voir Figure 35 pour une illustration de l'état initial du système de distribution. Cette gestion indépendante des transporteurs entre les détaillants et les clients finaux pose beaucoup de problèmes en termes de qualité, de délai et de coût engendré. Les meubles sont parfois cassés ou endommagés lors de la livraison et du montage, les délais de livraison ne sont pas respectés et les coûts de livraison peuvent être assez chers comparés à une livraison centralisée. Le prestataire logistique souhaite alors supprimer l'espace de stockage chez plusieurs détaillants, qui vont uniquement servir pour exposer les produits. Une fois que le client va choisir ses meubles, la commande va être passée au DC où toutes les commandes seront centralisées et une tournée de véhicule gérée par le DC va être effectuée pour livrer les clients dans un délai à respecter. Le système proposé est illustré par la Figure 36.

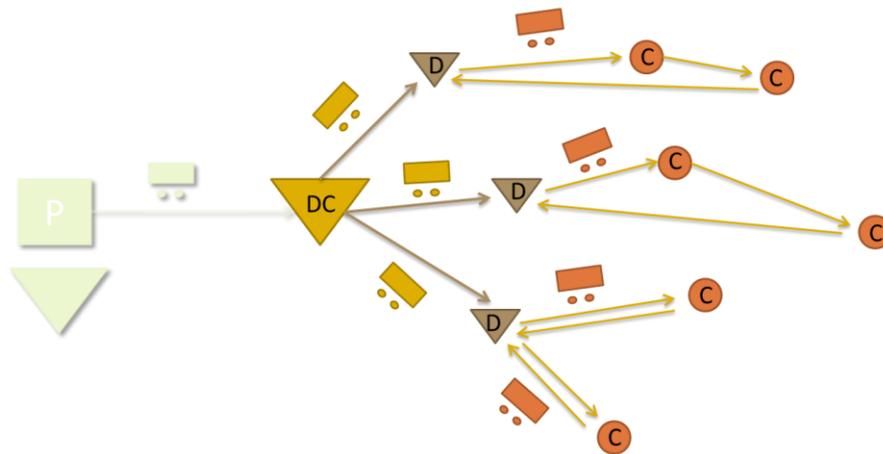


Figure 35. Illustration du système initial de distribution et de stockage utilisé par le prestataire logistique avant l'optimisation.

Pour ce nouveau système en perspective, notre projet consistait à proposer un modèle mathématique qui calcule le nombre total de véhicules de différentes capacités à acquérir et à louer en saison basse, saison haute et saison normale. Afin de modéliser ce problème, nous avons collecté l'historique des demandes chez plusieurs détaillants et du DC. Nous avons utilisé des techniques de prévision de demandes, et d'agrégation des données afin d'avoir une idée sur les demandes futures. Comme le problème était au niveau stratégique et concernait une décision prise pour plusieurs années, nous avons décidé d'agréger également les décisions de tournées de véhicules. Nous avons créé des zones de clients et nous avons affecté à ces zones des volumes moyennes commandés. Ce problème peut être nommé comme dimensionnement de flottes de véhicules hétérogènes où le VRP n'est pas pris en compte.

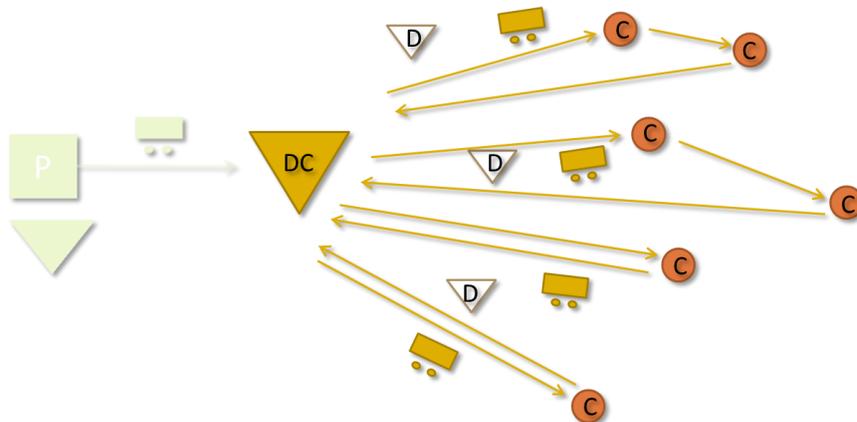
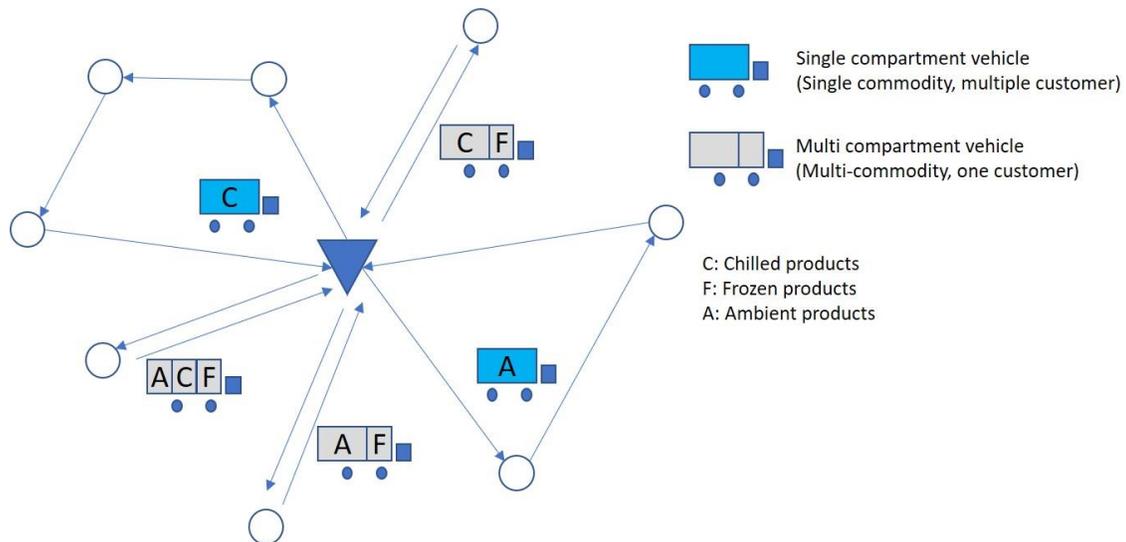


Figure 36. Illustration du nouveau système centralisé où les détaillants ne stockent plus et le DC devient le livreur principal.

Nous avons effectué une analyse très détaillée sur les données réelles, ce qui a donné un aperçu très réaliste du système au prestataire. L'étude théorique effectuée peut être trouvée dans notre publication Ertogral *et al.* (2017)²². Dans cette étude, notre étudiante de master S. Gonzalez nous a beaucoup aidé pour la partie expérimentale.

Problème de dimensionnement de flotte de véhicules à mono et à multi-compartiments

Dans le cadre d'une collaboration avec quelques collègues à l'université de Porto, nous étudions actuellement un problème de tournée de véhicule en utilisant des véhicules hétérogènes comportant mono ou multi compartiments. Le système logistique que nous considérons vient d'un cas réel qui a été étudié par Sara Martins lors de ses travaux précédents. Voir Figure 37 pour une illustration simple du système étudié. Un dépôt central doit approvisionner trois types de produits à ses clients : à température ambiante, frais et surgelé. Le prestataire logistique détient deux types de véhicules : véhicule à un seul compartiment (SCV) où un seul type de produit peut être chargé à chaque tournée et véhicule à multi compartiments (MCV) où toutes les combinaisons possibles de 3 produits peuvent être chargées. Les véhicules type MCV peuvent servir plusieurs clients sur une tournée.



Nous avons proposé deux formulations en PLNE pour ce problème où le but est de minimiser le coût d'acquisition et d'utilisation de ces véhicules en résolvant le VRP sur une seule période. Nous sommes en train d'étudier différentes heuristiques à implémenter pour résoudre des instances de grande taille pour lesquelles les solveurs commerciaux n'arrivent pas à donner la solution optimale en temps raisonnable. Nous supervisons actuellement un étudiant de master pour accélérer nos recherches. Les problèmes d'optimisation associés sont très complexes mais très intéressants en termes d'idées de méthodes de résolution à proposer. Pour un survey récent sur les VRP hétérogènes, voir Koç *et al.* (2016).

²² K. Ertogral, Akbalik, A. and González, S. Modelling and analysis of a strategic fleet sizing problem for a furniture distributor, **European J. Industrial Engineering** (2017)

Nos contributions importantes dans le domaine de Fleet sizing & VRP

Nos contributions au sein de la littérature du problème de dimensionnement de flottes de véhicules, intégré avec les décisions de tournée de véhicules pour des véhicules multi-compartiments, sont positionnées dans le Tableau 12. Notre objectif est de proposer des algorithmes efficaces pouvant répondre à des questions complexes mêlant à la fois la composition d'une flotte de véhicules mono et multi-compartiments, et des contraintes associées aux tournées à effectuer afin de satisfaire les demandes des clients à temps et en quantité requise. Dans la littérature il y a très peu d'études en ce qui concerne le problème de Fleet sizing intégré avec le VRP pour des véhicules multi-compartiments, et la majorité des travaux propose des heuristiques sans étudier profondément la structure des solutions dominantes. L'étude qui nous semble la plus proche de notre modèle et de nos hypothèses est celle de Ostermeier et Hübner (2018). Les auteurs traitent un problème de sélection de flotte de véhicules avec un mix de véhicules mono et multi-compartiments avec des véhicules hétérogènes. Comparé à cette étude, dans notre modèle nous tenons compte des contraintes réalistes supplémentaires suivantes :

- Les clients peuvent demander la livraison de leurs marchandises dans des fenêtres de temps bien spécifiques. Cette contrainte est justifiée par la pratique industrielle qui nous a motivé en amont de notre étude théorique. La majorité des clients souhaitent recevoir les produits frais tôt le matin pour les exposer dans leurs rayons tout au long de la journée. Cette contrainte rendra notre modèle plus consistant en termes de satisfaction des besoins réels des clients.

Tableau 12. Positionnement de notre étude au sein de l'état de l'art du problème de "Fleet Sizing & VRP".

| Authors, revue (year) | Time Windows | Single commodity | Multi commodity | Homogen Vehicles | Heterogen Vehicles | Single Compart | Multi Compart. | Single Trip | Multi Trip | Heuristics | Exact methods | Math. model | Other variant |
|--------------------------------------|--------------|------------------|-----------------|------------------|--------------------|----------------|----------------|-------------|------------|------------|---------------|-------------|---------------------|
| Ferland and Michelon JORS (1988) | X | X | | | X | X | | X | | X | X | X | |
| Taillard ROR (1999) | | X | | | X | X | | X | | X | | | |
| Dell'Amico et al. Trans. Sci. (2007) | X | X | | | X | X | | X | | X | | X | |
| Braysy et al. Trans. Sci. (2008) | X | X | | | X | X | | X | | X | | X | |
| Braysy et al. ESWA (2009) | X | X | | | X | X | | X | | X | | | |
| Derigs et al. OR Spectrum (2011) | | | X | X | | | X | X | | X | X | | |
| Wang et al. MPE (2014) | | | X | | X | | X | X | | X | | X | |
| Cattaruzza et al. C&OR (2014) | X | | X | X | | X | | | X | X | | | |
| Koç et al. C&OR (2015) | X | X | | | X | X | | X | | X | | | |
| Koç et al. EJOR (2016) | X | X | | | X | X | | X | | X | X | X | Depot location |
| Cattaruzza et al. Trans. Sci. (2016) | X | X | | X | | X | | | X | X | | | Release date |
| Hernandez et al. EJOR (2016) | X | X | | X | | X | | | X | | X | | Loading time |
| Hiermann et al. EJOR (2016) | X | X | | | X | X | | X | | X | X | X | Recharging Stations |
| Ostermeier and Hübner EJOR (2018) | | | X | | X | X | X | X | | X | | | |
| Our problem | X | | X | | X | X | X | X | X | X | X | X | |

- Une autre contrainte réaliste que nous ajoutons dans notre modèle consiste en la possibilité de multi-trips (tournées multiples), ce qui veut dire qu'un véhicule peut effectuer plusieurs tournées tout au long de la journée si la limite de temps le lui permet. Certes, cette contrainte rend beaucoup plus dur la modélisation mathématique et la résolution du problème, mais permet de calculer le nombre de véhicules nécessaire sur une semaine donnée d'une manière plus réaliste.
- Dans Ostermeier et Hübner (2018), les auteurs développent plutôt une heuristique adaptée au problème, tandis que dans notre étude, nous travaillons à la fois sur la résolution exacte et approchée.

En ce qui concerne notre étude du cas industriel d'un distributeur de meubles, notre contribution principale repose sur une analyse de données minutieuse afin de refléter les coûts et les contraintes de la pratique industrielle dans notre modèle mathématique. Le modèle en PLNE que nous avons proposé pour ce problème capture bien les différentes caractéristiques de l'application réelle. La partie expérience numérique et le commentaire des résultats qui en découlent permettront aussi bien aux praticiens qu'aux théoriciens d'avoir une bonne intuition sur l'impact de différents paramètres sur les coûts de location et d'achat de véhicule, sur le court terme ou le long terme.

PARTIE III

Mon projet de recherche

Les 16 ans d'activités de recherche que j'ai effectuées dans le domaine du *Lot Sizing* m'ont procuré une vision assez large sur ce problème offrant une panoplie de problématiques très intéressantes tant sur le plan théorique que pratique. Durant ces années, j'ai pu approfondir mes connaissances sur les outils d'optimisation combinatoire, la recherche opérationnelle et l'algorithmique qui me permettent d'avoir les bons réflexes lors de l'analyse approfondie de nouveaux problèmes, et surtout lors de leur résolution efficace. J'alimente mes connaissances en temps continue, en lisant les articles scientifiques publiés aussi bien sur le LSP, mais également sur différentes techniques d'optimisation ou sur d'autres problèmes d'optimisation qui se posent dans des domaines très variés, comme la bio-informatique, les nanotechnologies, la gestion intégrée des chaînes logistiques, etc. Ayant assisté à des workshops et conférences avec des sessions spéciales sur le LSP d'une manière régulière, j'arrive à clairement identifier les variantes qui n'ont pas encore été étudiées et dont les modèles mathématiques donneraient de nouvelles pistes de recherche à creuser.

60 ans de recherche après le premier article publié sur le ULSP par Wagner & Whitin (1958), avec mes collègues, nous identifions encore plusieurs variantes qui n'ont jamais été étudiées et qui peuvent avoir des apports positifs pour les industriels. Cette richesse thématique pourrait être expliquée d'une part grâce aux contraintes réelles en planification de production et d'approvisionnement qui peuvent être facilement intégrées dans le modèle LSP et de ce fait qui l'enrichissent, d'autre part grâce au nombre important de paramètres ayant un impact sur la complexité théorique de celui-ci. Ayant une vision globale des résultats théoriques publiés pour différentes variantes de LSP, j'arrive à guider mes étudiants vers les bonnes pistes et vers les bons travaux de recherche à lire et à analyser. Je vérifie régulièrement les articles publiés récemment sur mes thématiques de recherche et je porte une attention particulière sur les perspectives et les questions ouvertes. Je travaille dans un domaine où plusieurs articles *survey* sont publiés assez régulièrement et qui pointent vers les nouvelles pistes de recherche. Grâce à ma connaissance du domaine, je peux guider mes étudiants en master et en doctorat lors de la recherche d'une problématique intéressante n'ayant jamais été traitée auparavant. Une fois la problématique bien ciblée, je les guide dans la recherche des méthodes de résolution appropriées. Je donne une importance particulière à la façon d'exposer nos résultats : je cherche toujours une manière simple, précise, bien illustrée et bien argumentée pour les exposer, dans les articles ou devant le public. J'essaie de donner ces bonnes pratiques à tous mes étudiants.

Un article *survey* récent de Brahim *et al.* (2017) place plusieurs de nos travaux de recherche dans la littérature de LSP, parmi les articles publiés entre 2004-2016. Les différents tableaux récapitulatifs et comparatifs de ces travaux tirés de Brahim *et al.* (2017) sont donnés dans l'Annexe 1. J'ai surligné en bleu nos travaux de recherche pour montrer que nos contributions dans la littérature sont diverses et nombreuses. Ils touchent plusieurs variantes du LSP, et couvrent plusieurs approches de résolution, en passant par la programmation dynamique, Branch & Bound, Branch & Cut, approche polyédrale, étude de complexité, etc. Ces tableaux publiés récemment me donnent la motivation pour continuer mes travaux de recherche sur différentes variantes de LSP en les enrichissant avec diverses contraintes et diverses fonctions de coût. La section Conclusion & Discussion du papier de Brahim *et al.* (2017) pointent vers des pistes à creuser et donnent un aperçu général des perspectives et des questions ouvertes en LSP.

Parmi ces questions de recherche apparaissent **les problèmes intégrés et les problèmes de planification de production respectueuse de l'environnement, les deux axes que je souhaite continuer à creuser**. Détaillons tout d'abord ce qui est caché derrière les problèmes intégrés en planification de production que je souhaite étudier les années qui viennent. Dans la littérature il existe plusieurs thématiques de recherche en

optimisation et en RO qui sont bien étudiées et pour lesquelles plusieurs milliers de papiers sont publiés. Nous pouvons par exemple citer les problèmes de Cutting Stock, Knapsack Problem, VRP, IRP, ordonnancement, contrats, révision & maintenance. Lorsqu'il s'agit des problèmes intégrés en Lot sizing, il s'agit de l'intégration des contraintes et des coûts de l'un ou de plusieurs des problèmes cités ci-dessus au sein du LSP. Cette intégration permet d'étendre les limites du simple problème de la planification de production (ou d'approvisionnement) qui est le LSP, et de prendre en compte les contraintes des autres activités qui ont des liens étroits avec la production. Pour le problème de Cutting Stock intégré au LSP, il s'agit par exemple de prendre en compte des spécificités des plans de découpe au sein de l'atelier de production afin d'optimiser au mieux les approvisionnements des matières premières qui vont alimenter les opérations de découpe. L'approche intégrée va assurer la réduction du coût de livraison si l'approvisionnement se fait par batch, et permettra de mieux optimiser les coûts de changement de série lors des découpes. Brahim *et al.* (2017) mentionnent que LSP mono-produit n'a pas encore été intégré au Cutting Stock Problem. Dans un des projets que nous avons lancé avec les collègues de l'université de Porto, nous traitons le problème de Cutting Stock avec LSP mono-item et multi-item, avec l'approvisionnement par batch. Nous avons identifié plusieurs problèmes intéressants et nous avons déposé un projet bilatérale PESSOA 2020 afin de pouvoir continuer à collaborer ensemble. Dans notre équipe de LSP & Cutting Stock nous sommes quatre chercheurs titulaires et une post-doctorante.

Un autre problème intégré que je traite avec mes étudiants concerne les contrats type CRC (contrat de réservation de capacité) intégrés au sein du LSP. Le contrat type CRC est un domaine à part entière avec des milliers d'articles scientifiques publiés dessus. Un tel contrat assure au fournisseur et au détaillant une garantie sur le prix et sur la quantité à approvisionner. Le fournisseur est sûr qu'il vendra ses produits, donc peut faire des investissements conséquents, et le détaillant est sûr de pouvoir satisfaire ses demandes à un prix raisonnable. Les décisions liées à ces types de contrats (capacité à réserver, le prix en dessous et au-dessus de la capacité fixée, la période du contrat, etc.) ont un grand impact sur les décisions des quantités à approvisionner et à stocker sur un horizon donné. Cette intégration sur le plan déterministe a été très peu étudié dans la littérature et il reste plusieurs perspectives en cours issue de la thèse de doctorat de Mlouka Farhat. Nous continuons nos recherches activement sur cette thématique et nous alimentons la littérature du LSP intégré avec Mme Farhat qui est actuellement en poste d'ATER au département d'informatique de l'Université de Lorraine.

Le LSP est très malléable pour être intégré aux autres problèmes sur le plan théorique et pratique. Comme l'activité de la production est centrale dans une chaîne logistique, elle est naturellement en interaction avec d'autres départements et services. Une des activités primordiales qui touche la production est la maintenance & révision des machines. L'organisation des activités de révision représente une tâche extrêmement difficile et coûteuse, particulièrement chez les industriels qui font une production en continue (24h/24, 7j/7). Notre point de départ d'intégrer des activités de révision au sein du LSP est lié à une problématique industrielle, et concerne un grand producteur de bouteille en verre. Le planning des révisions des fours de fusion de verre étant très coûteux dû à l'arrêt total des fours sur plusieurs semaines, ceci conduit à la prise en compte des demandes et des capacités des autres fours à moyen terme afin de replanifier les quantités à produire sur chaque four. Ce problème a donné lieu à de nombreux problèmes d'optimisation très intéressants concernant le multi-item LSP small-bucket. Nous avons identifié plusieurs pistes pour continuer à creuser, en ce qui concerne DLSP, CSLP et PLSP. Nous continuons nos collaborations avec nos collègues Portugais pour résoudre ces problèmes.

Le dimensionnement de flottes de véhicules couplé ou non avec le VRP représente également une piste très intéressante pour être intégrée au sein du LSP. Actuellement nous traitons le problème de dimensionnement

de flottes hétérogènes, avec des véhicules mono et multi-compartiments couplé avec le VRP. A terme, nous pensons aussi à étudier comment intégrer ces tournées spécifiques avec la gestion des approvisionnements des clients. Ceci va nous conduire à faire un état de l'art des problèmes existants comme IRP (Inventory Routing Problem) et PRP (Production Routing Problem), puis à intégrer les tournées multi-compartiments tout en couplant avec la gestion des stocks chez les clients. Nous menons ce projet avec notre collègue post-doctorante, et nous avons encadré un étudiant de master il y a quelques mois.

Jusqu'ici j'ai développé les problèmes intégrés en planification de production comme mon premier axe de recherche. Mon deuxième axe de recherche étant la planification de production respectueuse de l'environnement, je vais développer dans ce paragraphe quelques thématiques que je souhaite étudier dans la suite. Lorsque l'activité de la production est très énergivore, la prise en compte de la consommation énergétique de divers process et des machines qui composent les ateliers de production devient cruciale au sein d'un planning de production. Ceci permet de réduire les coûts, mais aussi l'empreinte carbone de ces activités énergivore. Avant d'aborder le LSP intégré avec les contraintes et les coûts d'énergie en 2015, nous avons trouvé plusieurs études sur les problèmes d'ordonnancement intégrés avec la consommation énergétique, mais aucune étude n'avait auparavant traité le LSP mono-produit enrichi avec la consommation énergétique. Actuellement (quatre ans après notre première étude), nous trouvons de plus en plus d'articles publiés sur notre thématique. Ceci montre d'une part l'importance d'une telle approche et d'autre part la naissance de plusieurs autres pistes de recherche. Actuellement nous traitons un problème d'ajustement de capacité de production associé aux prix et à la capacité de différentes sources d'énergie : énergie renouvelable et énergie conventionnelle. A terme j'aimerais bien étudier les différentes possibilités de stockage d'énergie intégrées au sein de la planification de production. Dans la Partie III.1 les perspectives de ce projet sont détaillées.

Dans les paragraphes précédents, j'ai décrit les thématiques de recherche qui m'intéressent encore, et que je souhaiterais continuer à étudier dans les années qui viennent. Dans la suite, je vais développer les différents projets que je mène actuellement, associés à ces thématiques de recherche, en donnant quelques détails sur les perspectives et sur la méthodologie à utiliser. Plutôt que de rédiger plusieurs pages de projet de recherche d'une manière abstraite, je préfère me baser sur mes projets actuels, qui sont concrets, et qui vont continuer à alimenter mes étudiants et la littérature encore plusieurs années. Le plus dur n'est sans doute pas de rédiger de jolis projets, mais de les réaliser... D'où mon idée de vous donner un aperçu assez général des projets que je gère actuellement, avec divers collègues de différents pays et de différents domaines d'expertise.

Aperçu de mes projets actuels

Dans cette section je présente mes projets de recherche actuels que je souhaite continuer à développer dans les années qui viennent. Parmi ces projets apparaissent majoritairement mes travaux actuels en lot sizing et les travaux que nous développons avec des collègues de l'université de Porto sur les problèmes de Cutting stock & Packing et Fleet sizing. Le contenu de ces projets ayant été développé dans la section « Bilan de recherche », je m'attache ici à décrire les perspectives associées à ces problématiques en détaillant quelques méthodologies à utiliser. Voici une liste des projets dans lesquels je suis actuellement impliquée (voir Tableau 13) et pour lesquels je trace des perspectives dans les pages suivantes.

Tableau 13. Mes projets de recherche et collaborations actuels (2020).

| Projets/Collaborations | Titre | Les autres membres |
|---|--|---|
| EPOC (depuis 2015) | Energy-aware lot sizing problem | Céline Gicquel (Université Paris Sud, LRI) Bernard Penz (Inst Polytech. Grenoble-GSCOP) Christophe Rapine (Université de Lorraine) |
| LSP-CRC (depuis 2013) | Replenishment planning under capacity reservation contracts | Mlouka Farhat (Université de Lorraine) Atidel Hadj-Alouane (OASIS, ENIT, Tunis) Nathalie Sauer (Université de Lorraine) |
| Multi-item LSP (depuis 2018) | Multi item lot sizing problem with revision and replacement activities | Bernardo Almada-Lobo (University of Porto) Luis Guimarães (University of Porto) Christophe Rapine (Université de Lorraine) |
| Fleet sizing (depuis 2011) | Multi compartment vehicle routing problem and Fleet sizing | Kadir Ertogral (TOBB ETU, Ankara, Turquie) Sara Martins (University of Porto, INESC-TEC) Christophe Rapine (Université de Lorraine) |
| Semi-Fluid Packing (depuis 2018) | 2-stage non-exact guillotine cutting knapsack problem | João Pedro Pedroso (University of Porto) Christophe Rapine (Université de Lorraine) |
| CS-LSP (depuis 2019) | Cutting Stock Problem coupled with Lot Sizing Problem | Maria Antonia Caravilla (University of Porto) José Fernando Oliveira (University of Porto) Christophe Rapine (Université de Lorraine) Elsa Silva (University of Porto) |

La majorité de mes travaux de recherche a trait à la résolution du problème de dimensionnement de lots dans différents contextes. Ce problème de planification de production est très riche en termes de structure combinatoire, et permet d'avoir un éventail d'approches très large pour sa résolution. Sa structure multi-périodes avec la contrainte classique de conservation des flux d'une période sur l'autre donne la possibilité d'utiliser certaines propriétés des flots dans les réseaux. La propriété ZIO (Zero Inventory Ordering) permet de décomposer le problème global en sous-problèmes qui deviennent plus faciles à résoudre grâce aux propriétés de dominance. Dans le cas simple sans capacité de production (ULSP), l'enveloppe convexe du polyèdre associé est connue. Les facettes développées pour ce cas simple sont ensuite adaptées à des cas

plus contraints. Dans la littérature, plusieurs formulations étendues en PLNE ont été proposées pour résoudre efficacement le LSP. La programmation dynamique est aussi un outil utilisé assez couramment pour la résolution du LSP. Pour certaines extensions, notamment multi produits, des heuristiques, des méta-heuristiques, des approches de décomposition, des relaxations, etc. ont également été proposées.

Malgré le nombre important de publications traitant de ce problème, il reste encore beaucoup à explorer. Il est possible, via ce problème, de modéliser une multitude de contraintes associées aux systèmes de production, de stockage et de transport. Dans mes activités de recherche, j'ai fait un petit tour des différentes contraintes de capacité et d'approvisionnement à intégrer dans le LSP afin de rapprocher le modèle de cas plus réalistes. J'arrive à clairement voir qu'il reste encore une multitude de structures à étudier, encore insuffisamment traitées dans la littérature.

Une problématique particulièrement d'actualité, avec des enjeux importants, concerne la prise en compte des contraintes environnementales et énergétiques par la planification de production. Nous étions parmi les premiers chercheurs à avoir contribué dans la littérature du LSP à la prise en compte des contraintes énergétiques (voir projet EPOC). Il reste encore de nombreuses perspectives et nous continuons nos travaux de recherche sur ce problème. Concernant le LSP multi produits, très peu d'études portent sur les modèles *small-bucket* (DLSP, CSLP, PLSP) avec l'ajout de contraintes réalistes. En particulier, il existe peu de travaux qui étudient la structure du PLSP, ce qui constitue l'une de mes perspectives développées dans les sections suivantes. En ce qui concerne les contrats intégrés à la planification de production et des approvisionnements, il y a également très peu d'études dans la littérature, particulièrement sur le LSP. Nos travaux récents sur l'intégration des contrats de réservation de capacité et des contrats buyback dans le LSP représentent des contributions originales et importantes dans la littérature, qui ouvriront sûrement de nouvelles pistes à exploiter pour d'autres chercheurs.

J'ai aussi une curiosité pour d'autres problèmes d'optimisation qui ne sont pas du domaine de dimensionnement de lot. J'aime bien pousser mes limites et les limites des méthodes et des approches que je maîtrise. Cette curiosité m'a permis de lancer de nouvelles collaborations avec différents collègues de divers domaines d'expertise. A travers ces nouvelles thématiques, j'ai remarqué que la démarche scientifique que j'ai apprise à suivre pour résoudre les problèmes d'optimisation que je rencontre me permettait d'avoir des idées originales et pertinentes pour résoudre d'autres problèmes dans d'autres domaines. Ces projets transversaux permettent à chaque membre de partager ses connaissances et de développer de nouvelles techniques. Parmi ces problèmes je peux citer le Cutting Stock, les problèmes de Packing, de Fleet sizing et les problèmes non-linéaires dans le domaine de la microélectronique.

PARTIE III.1 PROJET EPOC

“EFFICACITE ENERGETIQUE EN PLANIFICATION DE PRODUCTION : MODELES ET ALGORITHMES D’OPTIMISATION COMBINATOIRE”

Contexte

Ce projet est une collaboration avec Céline Gicquel (Université Paris Sud, LRI), Bernard Penz (Institut Polytechnique de Grenoble - GSCOP) et Christophe Rapine (Université de Lorraine). Nous avons initié nos recherches en 2015, et nous avons obtenu 2 financements sur cette thématique dont un a été prolongé jusqu’à fin 2020 : un projet région Lorraine et un financement LMH-PGMO (voir Section II.1.1 pour plus de détails sur le contenu de ce projet).

Perspective 1. Stockage d’énergie et le LSP

Nous souhaitons intégrer la possibilité du stockage de l’énergie dans le planning de production et de la consommation énergétique. Stocker de l’énergie n’est pas totalement gratuit et demande un investissement préliminaire. Une fois les dispositifs spécifiques en place, la décision de quand et combien stocker d’énergie devient un vrai problème d’optimisation. Le fait d’intégrer ce choix au sein d’une optimisation conjointe de combien et quand produire afin de minimiser les coûts de production et de l’énergie nécessite la proposition de méthodes d’optimisation efficaces.

Dans la littérature il existe très peu de travaux concernant l’intégration du stockage de l’énergie au sein des décisions de la planification de la production. Une étude récente des chercheurs Wichmann *et al.* (2019) montre qu’il est possible de faire une économie allant jusqu’à 20% sur le coût total lorsque le stockage d’énergie est pris en compte dans la planification journalière de la production. Les auteurs étudient un problème d’ordonnement sur des micro-périodes afin de prendre en compte la charge et la décharge des batteries à court terme et couplent ces décisions avec celles du LSP classique. Depuis cette étude très récente, à notre connaissance il n’y a pas eu d’autres travaux dans le domaine du LSP intégrant le stockage d’énergie. Notre objectif est de reprendre un de nos modèles récemment étudié avec acquisition de capacité de production (nouvelles lignes de production, nouvelles machines, nouveaux postes de travail), et intégrer celui-ci avec le respect de la capacité énergétique provenant de deux sources d’énergie : renouvelable et conventionnelle. Afin de minimiser les coûts journaliers de consommation énergétique pour un producteur énergivore, notre but serait de décider à quels moments de la journée il serait préférable de stocker de l’énergie (e.g. en cas de surproduction d’énergie renouvelable) et à quels moments il faudrait utiliser cette énergie pour minimiser l’achat de l’électricité conventionnelle. Notre modèle serait très différent de celui considéré par Wichmann *et al.* (2019) du fait du système considéré avec extension de la capacité de production à décider.

Nous allons commencer à étudier ce problème en faisant une recherche approfondie des travaux portant sur les outils et méthodes de stockage de l'énergie, sur les modèles mathématiques qui découlent de ce stockage, les équations de chargement et de déchargement de batterie, etc. A part les batteries, il existe bien évidemment d'autres façons de stocker de l'énergie comme l'utilisation des vapeurs d'eau, de la chaleur générée par des machines, des barrages, air comprimé, etc. Une fois les modèles mathématiques reflètent le comportement des systèmes de stockage réels, notre deuxième étape consistera à trouver des méthodes intelligentes et efficaces de résolution de ces problèmes. Nos outils de la Recherche Opérationnelle et de l'Optimisation Combinatoire viendront à notre aide pour calculer les solutions optimales ou approchées pour ces systèmes.

Perspective 2. Modulation de la capacité de production

Une autre problématique qui peut être intéressante est la modulation de la capacité de production par rapport aux contraintes et aux coûts énergétiques. Pour réaliser ceci, on peut passer par plusieurs modes : l'arrêt ou la mise en veille des machines les plus énergivores à certaines périodes, la mise en place d'heures supplémentaires, le fonctionnement en plusieurs équipes (2x8, 3x8, week-end). La capacité de production peut être ainsi vue comme un ensemble (discret) de valeurs possibles, à planifier tout au long de l'horizon en tenant compte de différentes contraintes, pour adapter au mieux à la fois la capacité de production à la demande et la consommation électrique à la disponibilité en énergie. Les problèmes d'optimisation associés à ces cas réalistes nous semblent originaux et pertinents.

Ou et Feng (2018) étudient un problème similaire avec une capacité maximale de production à choisir parmi un ensemble discret. Ils font une étude de structure du problème, proposent des propriétés de dominance et développe un algorithme efficace de programmation dynamique en temps polynomial. Comparé à cette étude, notre originalité serait de tenir compte des coûts et des contraintes énergétiques en plus de ce choix de la modulation de la capacité de production. Comme la disponibilité d'énergie renouvelable est très dépendante de différentes sources d'énergie utilisées (photovoltaïque, éolien, etc.), et le coût de l'énergie conventionnel est très variable au cours de la journée, une telle prise en compte peut s'avérer économe en énergie et en coût.

Nous voulons aborder ces nouveaux problèmes de lot sizing enrichis avec des contraintes de capacité modulable et de gestion énergétique d'un point de vue théorique, en étudiant leur complexité et en identifiant des problèmes particuliers pour lesquels des approches de résolutions polynomiales existent. Une étape importante est de comprendre la structure de ces problèmes et des solutions optimales (propriétés de dominance) pour pouvoir proposer des approches de résolution efficaces : programmation dynamique, décomposition du problème, relaxation pouvant fournir de bonnes bornes inférieures. Les résultats attendus seront le développement de nouvelles approches de résolution, exactes ou approchées, pouvant répondre aux besoins théoriques et pratiques.

Perspective 3. Robustesse et gestion de l'énergie pour le LSP

Un autre aspect que nous voulons traiter est l'étude de ces problèmes en présence d'incertitudes sur les données, que ce soit sur les demandes clients à satisfaire, sur les capacités journalières ou sur la disponibilité des sources d'énergies renouvelables. Nous voulons étudier si une approche robuste peut conduire à des résultats intéressants sur ces problèmes.

La robustesse est devenue un outil assez courant pour prendre en compte les aléas liés aux paramètres du système considéré. Pendant très longtemps, les chercheurs ont traité les incertitudes au sein des problèmes d'optimisation avec l'aide de la programmation stochastique basé sur des arbres de scénarios. Dans cette approche il ne faut pas oublier qu'il faut à tout prix connaître ou approximer la fonction de distribution probabiliste des paramètres incertains, (Zhengyang & H., 2020). Donc, il faut étudier les historiques, faire des études statistiques et surtout prendre le risque que ce ne soit pas la bonne loi qui décrit le comportement du système étudié. Un autre inconvénient de cette approche pour le LSP, qui est un problème multi-périodes, réside dans le fait que le nombre de scénarios à générer croît exponentiellement en fonction du nombre de périodes. Afin d'éviter ces genres de soucis, il y a de plus en plus de chercheurs qui ont commencé à utiliser l'approche robuste pour résoudre les problèmes d'optimisation posé dans les systèmes ayant des paramètres incertains. Les lecteurs intéressés peuvent se référer aux travaux de Bertsimas et Thiele (2006), Bertsimas et Sim, (2004), etc.

Pour décrire très brièvement, l'idée de la robustesse réside dans le fait de considérer un intervalle où va bouger le(s) paramètre(s) incertain(s), afin d'éviter l'utilisation des fonctions probabilistes. L'intervalle sert à déterminer les bornes de ce paramètre dans les pires cas : de combien on peut s'écarter de la valeur nominale ? L'objectif de l'optimisation robuste est de fournir la meilleure solution faisable dans le pire des cas. Le but peut donc être en quelque sorte de minimiser le maximum des regrets pour certains types de problème. Comme on tente d'optimiser le pire des cas, on peut, pour certaines configurations de problème, s'écarter trop de ce qui peut se passer en moyenne. On peut aussi certaines fois être très conservateur, cela peut augmenter le coût inutilement. Pour éviter trop de conservatisme, un des moyens est de limiter le nombre de fois où on s'écartera de la valeur nominale en fixant un budget dès le départ.

Le but dans nos recherches sera en premier lieu de décider comment modéliser la fonction objectif et les diverses contraintes si le paramètre incertain est la quantité disponible de l'énergie renouvelable à chaque période. Dans notre système à deux sources d'énergie, l'incertitude associée à cette quantité va forcément impacter la quantité à produire, la quantité de l'énergie conventionnelle à acheter, la quantité à stocker à chaque période, etc. Nous verrons ensuite si des algorithmes polynomiaux existent pour résoudre la version robuste de notre problème.

PARTIE III.2 PROJET LSP-CRC

“REPLENISHMENT PLANNING UNDER CAPACITY RESERVATION CONTRACTS”

Contexte

Nous collaborons avec Mlouka Farhat (ENIT, Université de Lorraine), Atidel Hadj-Alouane (OASIS, ENIT) et Nathalie Sauer (Université de Lorraine) autour de cette problématique qui fait le lien entre LSP et différents types de contrats entre détaillants et fournisseurs. Les divers contrats dans les chaînes logistiques sont bien étudiés dans la littérature, mais à une échelle plus large, en gestion des chaînes logistiques entre différents acteurs, ou pour des systèmes avec des données incertaines (e.g. demande stochastique). Les termes du contrat sont souvent établis sans tenir compte de la périodicité ni des coûts de stockage engendrés. Dans ce projet, nous étudions le cas déterministe et multi-périodes afin de modéliser la partie approvisionnement couplée avec différents paramètres du contrat buyback. Dans la littérature, nous sommes les premiers à avoir analysé le LSP avec production par batch en tenant compte des contrats à réservation de capacité. Nous sommes également les premiers à avoir intégré le contrat spécifique, nommé buyback, au sein des contraintes de la planification de production et d’approvisionnement. Depuis notre premier article dans ce domaine (Akbalik et al. (2017)), il y a eu plusieurs autres publiés sur des thématiques similaires. Il reste encore plusieurs perspectives à traiter dans ce domaine qui reste très prometteur et aussi très vaste.

Voir Section II.2.2 pour plus de détails sur notre bilan sur LSP-CRC. Les perspectives ont été adaptées du manuscrit de thèse de Farhat.

Perspective 1. LSP multi modes et CRC

Ce projet a donné lieu à une multitude de perspectives, sachant que le contrat buyback n’a jamais été intégré au problème déterministe et multi-périodes de lot sizing auparavant. Nous avons étudié un système composé d’un détaillant qui assure son approvisionnement depuis un fournisseur au moyen de véhicules à capacité fixée pour un seul type de produit. Une perspective est de pouvoir étendre nos résultats à un système de multi fournisseurs, avec qui différents types de contrats buyback sont signés. Comment coordonner une telle chaîne logistique semble très intéressant à étudier.

Nous pourrions ainsi coupler ce projet avec nos résultats obtenus dans le domaine d’approvisionnement à multi modes (voir Akbalik et Rapine (2018)) où les approvisionnements se font depuis plusieurs fournisseurs. Dans plusieurs secteurs, les producteurs détiennent d’une liste de fournisseurs pour se faire approvisionner le même type de produit, et ceci afin de se protéger en cas de rupture de stock et/ou de fermeture de ces derniers. La raison peut aussi simplement être économique, pour faire jouer la concurrence. Dans ce cas, trouver le contrat avec les bons paramètres qui optimisent le coût total à la fois pour le fournisseur et pour le producteur devient crucial. Notre problématique devient donc la

recherche des quantités optimales à approvisionner depuis plusieurs fournisseurs, à chaque période, en respectant la capacité réservée chez chaque fournisseur et en minimisant le coût total. Il faut bien évidemment satisfaire les demandes déterministes sur un horizon fini tout en respectant les termes des contrats signés avec ces fournisseurs. Nous sommes convaincus que les modèles mathématiques qui vont en découler seront prometteurs pour une analyse approfondie. Nous étudierons la structure des solutions optimales et proposerons des méthodes efficaces de résolution.

Perspective 2. LSP-BB avec retours périodiques

Il serait intéressant d'examiner le LSP-BB avec une autre forme de contrat buyback qui impose des limitations périodiques sur la quantité pouvant être retournée. Nous pouvons donner l'exemple d'un tabac-presse qui vend des journaux et des magazines, et qui se fait approvisionner tous les lundis en nouveaux hebdomadaires, et qui a la possibilité de retourner une partie de ses magazines invendus seulement durant le premier mois, d'une manière cyclique, tous les lundis.

Dans ce cas le modèle mathématique associé va être complètement différent. Il sera intéressant de voir si les propriétés de dominance proposées pour les cas précédents restent valides pour ce nouveau cas. Il faudrait sûrement adapter les programmes dynamiques pour le résoudre, car les états et les décisions à prendre ne seront plus pareils. Il faudrait aussi adapter le programme linéaire en nombres entiers en modifiant la fonction objectif et les contraintes. Le but est de permettre de couvrir différents cas réalistes qui peuvent se présenter lors des contrats buyback entre le détaillant et le fournisseur avec des retours périodiques.

Perspective 3. Multi produits / Multi niveaux

Les problèmes multi produits et/ou multi-niveaux peuvent être assez intéressants à développer, mais sûrement très durs à résoudre. Par exemple, on peut envisager un système avec plusieurs produits qui arrivent par batch chez un détaillant avec la possibilité de retour au fournisseur. La quantité totale retournée à la période t de tous les produits peut être limitée par une quantité fixée par le fournisseur. En ce qui concerne l'extension multi-niveaux, on peut imaginer un système avec plusieurs fournisseurs en série qui réapprovisionnent un type de produit par batch depuis le niveau amont. Ces différents niveaux peuvent disposer de divers contrats buyback.

Dans la littérature il y a une multitude de travaux concernant le LSP multi produits, qui est démontré NP-complet par Bitran et Yanasse (1982) pour le cas avec une capacité de production limitée. LSP multi produits reste NP-complet même pour le cas très restreint avec seulement deux produits, une capacité croissante ou non-décroissante, coût de production et de stockage unitaire étant nuls et un coût de setup de production étant constant. Depuis ces premiers travaux, le nombre de papiers traitant le LSP multi produits n'a cessé d'augmenter. D'un côté ce problème couvre plusieurs cas réalistes où une capacité commune est partagée par plusieurs types de produits (fours, lignes de production, opérateurs,

etc.), d'un autre côté le problème devient théoriquement intéressant pour être traité. Différents types de méthodes et d'approches de résolution ont vu le jour pour trouver la solution optimale ou approchée pour le LSP multi produits. Nous souhaitons commencer à prendre en compte deux types de produits pour voir l'applicabilité de certaines de nos méthodes proposées pour le cas mono produit. Ces deux produits partageront la même capacité d'approvisionnement (e.g. la capacité de véhicule, la capacité d'une palette, etc.) et engendreront le même coût fixe dû à l'utilisation de cette capacité. Une fois le problème analysé et résolu, on pourra ainsi pousser les limites théoriques de celui-ci pour trois ou plus de produits.

Le LSP multi niveaux est une autre piste à creuser avec une série de fournisseurs qui approvisionnent à tour de rôle ses successeurs. Un exemple très intéressant provient du secteur aéronautique. Les fournisseurs qui approvisionnent les composants et les sous-systèmes chez les constructeurs d'avions sont eux-mêmes approvisionnés par d'autres fournisseurs en amont, qui eux-mêmes approvisionnés par d'autres, etc. Cet enchaînement peut durer bien longtemps ! Dans ce contexte où les délais sont de plus en plus courts, les coûts de plus en plus bas et la demande de qualité de plus en plus haut, les fournisseurs sont toujours sollicités pour être extrêmement fiables sur ces trois points. Les fournisseurs sont souvent contraints de signer des contrats à long terme (sur des durées de 10 à 15 ans), pour s'engager à couvrir la demande de leur client sur la durée du contrat, de proposer des réductions de prix et d'endosser la responsabilité en cas de problèmes éventuels pour minimiser leurs risques²³. Il serait très intéressant d'étudier les types de contrats s'inscrivant dans ce contexte précis et de coupler les termes de ces contrats à multi niveaux avec les décisions d'approvisionnement à long terme.

Perspective 4. Survey CRC & LSP

🌿 D'autres types de contrats de réservation de capacité peuvent être intégrés au sein du LSP comme le pay-to-delay, la flexibilité de quantité, le back-up, le minimum commitment et le partage des revenus. Actuellement nous travaillons sur un article survey sur le LSP et les contrats de réservation de capacité (CRC) où chaque type de contrat cité ci-dessus sera intégré à tour de rôle au sein du LSP. Notre objectif est de capturer les spécificités de chaque contrat, de les justifier avec des exemples réels, de modéliser ensuite les termes de ces contrats sous forme de contraintes mathématiques et de les intégrer dans nos modèles existants du LSP. L'objectif serait de faire une liste de tous les problèmes intégrés du LSP et différents contrats de CRC pour ouvrir des pistes intéressantes aux autres chercheurs du domaine. Certains de ces modèles sont déjà introduits assez brièvement dans le manuscrit de thèse de Mlouka Farhat (2019). Notre but est de faire une publication consistante qui couvre tous les sous-types de contrat CRC et leur intégration dans le LSP. Nous souhaitons également donner les modèles mathématiques sous forme de programme linéaire en nombres entiers pour chaque problème décrit. Ce dernier servira à mieux cadrer les contours de ces problèmes intégrés, qui, en réalité peuvent être beaucoup plus complexes que les modèles présentés.

²³ <https://ifwe.3ds.com/fr/aerospace-defense/aerospace-suppliers>

PARTIE III.3 PROJET MULTI-ITEM LSP

“MULTI-ITEM LSP WITH REPLACEMENT AND REVISION ACTIVITIES”

Contexte

Ce projet a été initié dans le cadre de ma visite de 3 mois à l’université de Porto au printemps 2018. Notre équipe est constituée de Bernardo Almada-Lobo, Luis Guimarães et Christophe Rapine. La problématique est issue d’un cas industriel : il s’agit de la production de bouteille en verre dans un système à deux niveaux. Nous avons étudié ce problème au niveau stratégique et tactique. La décision de révision ou de remplacement de certains fours de fusion étant déjà prise, le but est de placer ces périodes d’inactivité dans le planning de production à moyen terme et de décider quelle couleur produire sur quels fours sur un horizon de quelques années. Comme les changements de couleur dans les fours prennent beaucoup de temps et les changements de série sont très coûteux, ceci nous amène à étudier un problème LSP multi machines, multi produits, avec des capacités de production saturées à toutes les périodes. Voir Section II.1.2.

Perspective 1. Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem

Nous travaillons depuis le printemps 2018 sur ce problème du point de vue théorique afin de développer des algorithmes efficaces de résolution. Un problème très intéressant que nous traitons actuellement est le PLSP (Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem). Après une étude de littérature du problème LSP multi item, nous avons identifié PLSP comme le modèle le plus pertinent pour décrire le système de production associé aux fours de fusion. La durée d’une période que nous avons choisie étant un mois (après une analyse profonde du fonctionnement du système réel), les périodes d’inactivités dues aux révisions/remplacement peuvent tomber en plein milieu du mois, ce qui implique une coupure de production en plein milieu d’une période du LSP. Dans le cas classique, les décisions du LSP sont prises soit en début de période, soit en fin de période, mais jamais au milieu. D’où le nom du PLSP, qui comprend également « Scheduling » (Ordonnancement), qui est plus proche d’un problème continue, contrairement au LSP qui, lui, est discret.

Nous avons déjà développé des algorithmes efficaces pour différentes extensions et des cas spéciaux du PLSP : deux items-une machine, deux items-deux machines, deux items-plusieurs machines. Nous sommes actuellement en train de rédiger un papier pour soumettre à une revue internationale avec tous nos résultats originaux pour ce problème. Une perspective qui nous intéresse beaucoup est le cas avec multi produits. Comme mentionné ci-dessus, nous avons développé des algorithmes pour le cas à deux items. Lorsque nous avons trois types de produits, nous ne connaissons pas encore la complexité du même problème : est-ce qu’on peut encore proposer des algorithmes en temps polynomial ? Ou alors

le problème devient NP-complet ? Dans le cas industriel de la production de verre qui nous a motivé pour étudier ce problème, il existe plusieurs types de bouteilles en verre de différentes couleurs. Même si en réalité les producteurs fabriquent uniquement deux à trois différentes couleurs sur quelques mois d'horizon dans le même four, théoriquement nous souhaiterions connaître les limites de nos approches en les poussant pour trois ou plus de couleurs. Ces méthodes générales pourraient ainsi être appliquées à plein d'autres cas réalistes ayant une production de plusieurs types de produits, dans d'autres secteurs.

Perspective 2. Discrete Lot Sizing Problem à multi-produits

Nous travaillons également sur le DLSP (Discrete Lot Sizing Problem) multi produits sur les extensions qui n'ont jamais été étudiées, comme l'ajout de ventes différées, ventes perdues. Voir ci-dessous quelques résultats de complexité concernant les trois problèmes PLSP, DLSP et CSLP. Ce tableau est une adaptation inspirée de Vanderbeck (1998). Il reste donc des problèmes ouverts dont la complexité n'est pas encore connue à ce jour.

| | single-item | n fixed | n part of the input |
|------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| DLSP | polynomial $O(TD)$ | polynomial $O(nTD^n)$ | strongly NP-hard |
| CSLP | polynomial $O(T^6)$ | open | NP-hard CSLP \propto DLSP |
| PLSP | polynomial \equiv CSLP | open | NP-hard PLSP \propto DLSP |

Perspective 3. Continuous Setup Lot Sizing Problem

Le CSLP (Continuous Setup Lot Sizing Problem) est aussi très intéressant à étudier. Il peut être vu comme small bucket du CLSP (Capacitated Lot Sizing Problem), qui lui est big bucket. Dans notre problème de fours de fusion, lorsqu'il s'agit des capacités minimum et maximum à respecter, nous tombons dans ce cas. Le nombre de setup par période est encore limité à un, mais doit être obligatoirement placé en début de la période en question. Comparé au DLSP cité ci-dessus, la différence du CSLP réside dans le fait de relâcher la contrainte « all-or-nothing ». Donc n'importe quelle quantité peut être produite au cours de la période en question. Clairement, CSLP est une relaxation de DLSP, qui, lui-même est une relaxation du PLSP. N'importe quelle solution réalisable pour DLSP est réalisable pour CSLP. En partant de cette observation, ce serait très intéressant de déterminer la complexité de chacun de ces trois problèmes dans le cas où la capacité de production est stationnaire : pour le cas mono-item, multi-item avec le nombre de types de produits étant fixé à n et pour multi-item avec n faisant partie de l'instance d'entrée. Dans la littérature il existe quelques travaux intéressants quant à la complexité de certaines extensions de ce problème, voir Brüggemann et Jahnke (2000), Vanderbeck (1998). Néanmoins, il reste plusieurs cas ouverts qui attirent notre attention.

PARTIE III.4 PROJET FLEET SIZING

“MULTI-COMPARTMENT VRP AND FLEET SIZING”

Contexte

Nous avons commencé à développer cette problématique de recherche « Fleet Sizing and VRP-TW avec des véhicules multi-compartiments » avec Sara Martin (chercheuse Post-Doctorante à l'Université de Porto) et Christophe Rapine, lors de mon premier séjour à l'université de Porto, au printemps 2018. Nous avons décidé d'encadrer un étudiant de master au printemps 2019 sur ce sujet pour avancer plus vite sur les développements informatiques. Tiago Vasconcelos (étudiant en Master 2 – Informatique) nous aide sur l'implémentation des formulations PLNE sur Cplex et la partie expérimentale. Voir le Section II.3 pour plus de détails sur la description de ce problème et notre bilan.

Nous travaillons sur le problème de tournée de véhicule (VRP) utilisant des véhicules hétérogènes : certains ont un seul compartiment (SCV) et peuvent servir plusieurs clients tout en étant limités à un seul produit par tournée, et certaines ont multi compartiments (MCV, 3 compartiments dans notre cas) et peuvent uniquement servir un seul client mais en délivrant plusieurs produits. Notre but étant de déterminer le nombre total de véhicules de chaque type (MCV et SCV) à utiliser, ce problème se situe parmi les problèmes de dimensionnement de flottes de véhicules. Pour les SCV, des tournées optimums doivent être calculés, mais tout en prenant en compte les livraisons directes faites par les MCV.

Nous avons proposé deux PLNE qui donnent la solution optimale pour notre problème, mais pour des instances de 25 clients et 3 produits, les limites de temps sont vite atteintes (8% de gap final au bout de 4h). Lorsque le nombre de clients dépasse 75 les deux PLNE prennent beaucoup de temps pour trouver une solution en temps raisonnable. Nous avons proposé deux heuristiques type « route-first-cluster-second » qui donnent des résultats assez rapidement avec un gap final moins élevé que le PLNE. Voici quelques perspectives qui nous semblent intéressantes à creuser pour la suite :

Perspective 1. MC-VRP with Time Windows

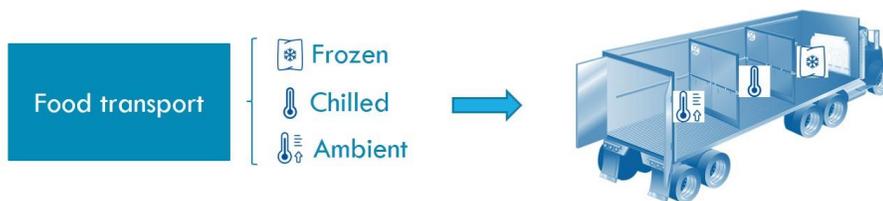
Dans le problème de départ industriel qui nous a motivé, les détaillants qui passent des commandes pour les trois types de produits (ambient, frais et surgelé) imposent également des fenêtres de temps concernant les livraisons. Lors du transport de ces produits, l'heure du passage chez différents clients aura certainement un impact sur les décisions des tournées et sur les coûts. Il faudra donc réadapter nos heuristiques et nos modèles mathématiques pour respecter ces nouvelles contraintes. Dans la littérature du VRP, il existe plusieurs travaux portant sur cette variante, mais sans considérer l'hypothèse multi compartiment. Nous allons donc intégrer ces deux aspects venant du cas industriel afin de proposer des méthodes robustes, répondant aux besoins du monde réel.

Perspective 2. MC-VRP with multi-trip

Nous pensons à introduire le concept de 'multi trips' afin de calculer le nombre correct de véhicules nécessaires pendant les tournées. Le VRP multi trip autorise aux véhicules de faire plusieurs tournées sur la période en question. Dans le VRP classique la recherche est basée sur les routes optimales à effectuer afin de satisfaire les demandes des clients tout en minimisant un certain critère. La notion de multi trip nécessite en plus l'affectation de toutes ces routes à des véhicules spécifiques, en fonction de la capacité de chaque véhicule, du volume demandé et de l'intervalle de temps pour ces demandes. Cette variante de VRP multi trip est souvent motivée lors des tournées en zone urbaine, où le temps d'une tournée peut être assez court comparé à des zones plus éparses. Les premiers travaux de la littérature portant sur cette variante font l'affectation des routes à des véhicules à l'aide des heuristiques basées sur Bin Packing Problem. Lorsqu'il s'agit en plus des fenêtres de temps à respecter, Olivera et Viera (2007) soulignent dans leur article que Bin Packing ne peut plus être utilisé pour la résolution. Tabu search et Large Neighborhood search heuristics sont les techniques qui ressortent plus dans la littérature en ce qui concerne la résolution de cette variante.

Perspective 3. MC-VRP with dedicated compartments

Une autre perspective serait de considérer des compartiments fixes et dédiés à un seul type de produit, avec des dimensions bien définies. Cette configuration nous semble réaliste pour certains types de véhicule où les parois séparant différents types de produits ne sont pas flexibles. Le modèle PLNE peut devenir un peu plus compliqué à décrire mais le problème reste très intéressant à être étudié. Le nombre de variables de décision va croître dramatiquement qui pourrait rendre la procédure Branch & Bound plus lourde pour des grandes instances. Des inégalités valides pourraient être identifiées et intégrées dans une procédure de Branch & Cut afin d'alléger l'arbre d'énumération.



Single-compartment vehicles
(SCV)



Multi-compartment vehicles
(MCV)



Multi-compartment vehicles
(MCV)



PARTIE III.5 PROJET SEMI-FLUID PACKING

“2-STAGE GUILLOTINE-CUTTING KNAPSACK PROBLEM”

Contexte

Ce projet « Semi-Fluid Packing » est issu d’une collaboration avec João Pedro Pedroso et Christophe Rapine. La motivation industrielle provient du remplissage des conteneurs 3D avec des tuyaux de différentes dimensions, en veillant à ne pas empiler des tuyaux qui dépasseraient ceux qui sont déjà placés en dessous. L’objectif est de maximiser le profit total des tuyaux rangés dans le conteneur. La raison pour laquelle ce problème est appelé Semi-Fluid Packing vient du fait du comportement des tuyaux lorsqu’on veut les empiler l’un sur l’autre : ils prennent la forme de la base de l’objet qui les contiennent. Ils ne sont ni liquide, ni solide. Un produit semi-fluide a la particularité de se comporter à la fois comme un produit solide, dont la largeur est indéformable, et comme un produit liquide, dont la hauteur est modifiée lorsque le produit prend la forme du conteneur où il est placé, le volume lui restant constant. Les tuyaux, les tiges métalliques, les troncs d’arbre de faible diamètre sont des exemples industriels de produits se comportant comme des semi-fluides. J.P. Pedroso a déjà étudié le cas 3D très récemment, pour lequel il a proposé des heuristiques, voir Pedroso (2020). Nous avons considéré ce problème en 2D, en le reformulant comme un problème de packing d’objets rectangulaires (les tuyaux vus de profil) dans un rectangle (le conteneur).

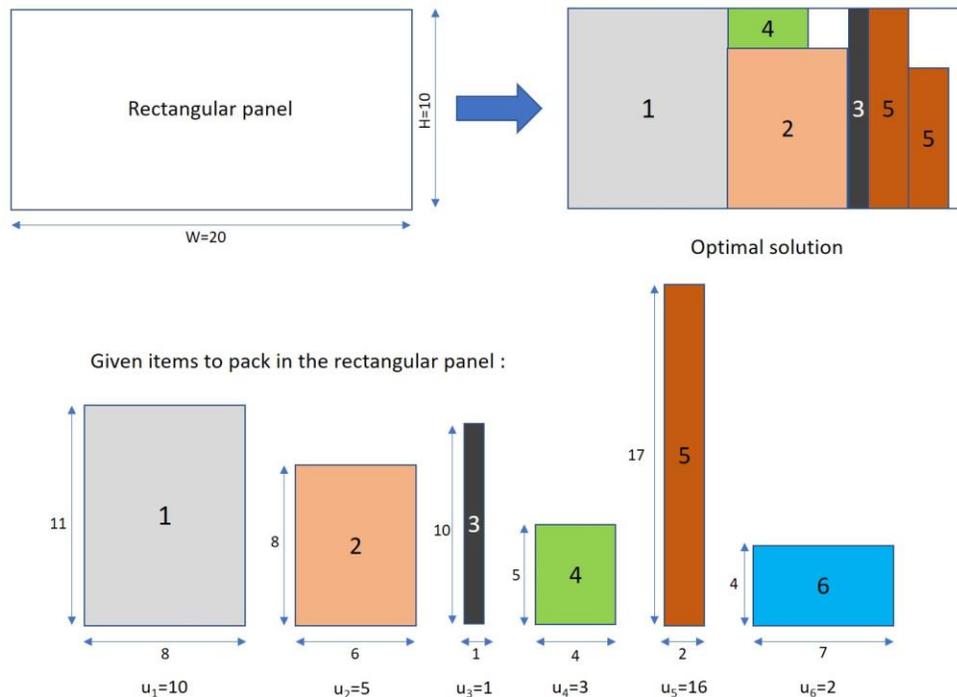


Figure 38. Illustration for our project "Semi Fluid Packing".

Les deux contraintes originales sont traduites comme :

- i. Un objet placé sur un autre objet ne doit pas dépasser la largeur de celui-ci.
- ii. On peut couper la hauteur des objets comme on le souhaite, et on peut les placer seulement en partie ou en plusieurs morceaux dans le rectangle initial.

La contrainte (i) vient de la nécessité de ne pas abîmer la forme des tiges lorsqu'elles sont superposées et d'assurer la stabilité. Ce problème peut également se formuler comme un problème de découpe 2D. La contrainte de rangement (i) correspond à se restreindre à des coupes guillotines, la première direction de coupe séparant les piles, la seconde séparant les objets empilés, la troisième séparant des chutes. Le problème est donc similaire au « Non-exact 2-staged 2D Knapsack problem », étudié notamment par Lodi et Monaci (2003). Avoir des objets divisibles (ii) est équivalent à considérer des hauteurs unitaires, ce qui revient à diviser chaque objet de hauteur h en h objets de hauteur 1. Cependant, décrire individuellement chaque objet de hauteur unitaire augmente dramatiquement la taille de l'instance. Notre problème correspond alors à un codage en *high-multiplicity*. Ce dernier rend les algorithmes proposés dans la littérature moins efficaces, qui ne peuvent plus éliminer de schéma de découpe, comme proposé dans Furini *et al.* (2016).

Nous avons démontré que ce problème est NP-difficile. La difficulté combinatoire du problème vient du fait que décider quels objets ranger dans une boîte de hauteur $H=1$ revient à résoudre un problème de sac à dos à une dimension. Un rangement peut être très complexe, un même objet pouvant être découpé plusieurs fois et placé dans différentes piles. Nous avons établi qu'une structure simple de rangements, dits canoniques, est dominante : dans un tel rangement, les objets sont rangés de gauche à droite par largeur décroissante, éventuellement avec une hauteur nulle. Nous utilisons donc cette idée de rangement canonique afin de décomposer la structure globale du problème. Cette décomposition nous permet de proposer un algorithme de résolution en temps polynomial $O(n^2)$ avec n étant le nombre d'objets à ranger, dans le cas où tous les objets ont la même utilité, ou la même largeur. Cet algorithme est généralisé au cas où au plus b utilités différentes (ou b largeurs différentes) apparaissent dans l'instance.

Nous avons proposé une formulation en PLNE et un programme dynamique en temps pseudo-polynomial, ce qui montre que notre problème est NP-difficile au sens faible. Nous avons également proposé des heuristiques pour résoudre ce problème dans le cas général. Nous finalisons actuellement la rédaction d'un article revue. Il reste plusieurs perspectives très intéressantes à creuser pour la suite.

Perspective 1. Adaptation au cas 3D

Il reste à savoir si les méthodes efficaces développées pour le cas 2D pourraient être adaptées au cas 3D. Cette adaptation nous semble prometteuse, car nous avons utilisé le comportement des semi-fluides pour décrire les deux contraintes (i) et (ii) en 2D. Dans la réalité lorsque les tuyaux sont superposés les uns au-dessus des autres, en 2D le même effet va apparaître.



Figure 39. 3D Packing for semifluids, Photo by Kevin Frayer/Getty Images.

Perspective 2. Multi-stage cutting for semifluid

Nous avons classé ce problème dans la littérature de « Non-exact 2-staged 2D Knapsack problem ». Le fait d'être 2-staged vient du fait d'autoriser seulement des découpes type « guillotine » d'abord dans un sens (verticale pour notre problème), puis dans l'autre (horizontale). Le fait d'être non-exact lui, vient du fait d'autoriser des découpes dites « trimming » qui permettent de faire des chutes afin de donner la forme finale de l'objet. Dans cette perspective, nous souhaitons autoriser des coupes multi-stage, donc aucune limitation à imposer sur le nombre de découpe guillotine. Est-ce que nos méthodes efficaces continuent d'être aussi performantes ? Quelles seront leur limite ? Quels genres de problèmes réels peut-on résoudre avec cette nouvelle hypothèse ?

Perspective 3. Développement d'heuristiques

A travers les tests numériques, nous avons observé certaines limites de performance pour le PLNE et l'algorithme de programmation dynamique. Pour ces instances nous pouvons développer des heuristiques efficaces qui pourraient fournir une solution approchée en temps raisonnable.

PARTIE III.6 PROJET CS-LSP

“CUTTING STOCK PROBLEM COUPLED WITH LOT SIZING PROBLEM”

Contexte

Au printemps 2019, nous avons commencé une nouvelle collaboration avec José Fernando Oliveira, Maria Antonia Carravilla, Elsa Silva (U. Porto) et Christophe Rapine. JF Oliveira est mondialement connu pour ses travaux en Cutting Stock et Packing (CSP), et a réalisé plusieurs projets avec MA Caravilla sur des problèmes de logistiques. Nous avons débuté une collaboration sur l’optimisation intégrée des problèmes d’approvisionnement et de découpe. Nous voulons ainsi croiser nos domaines d’expertises respectifs : Cutting Stock qui est le domaine d’expertise de nos collègues Portugais et LSP-B qui constitue notre domaine d’expertise avec Christophe Rapine. Nous nous intéressons au problème illustré ci-dessous :

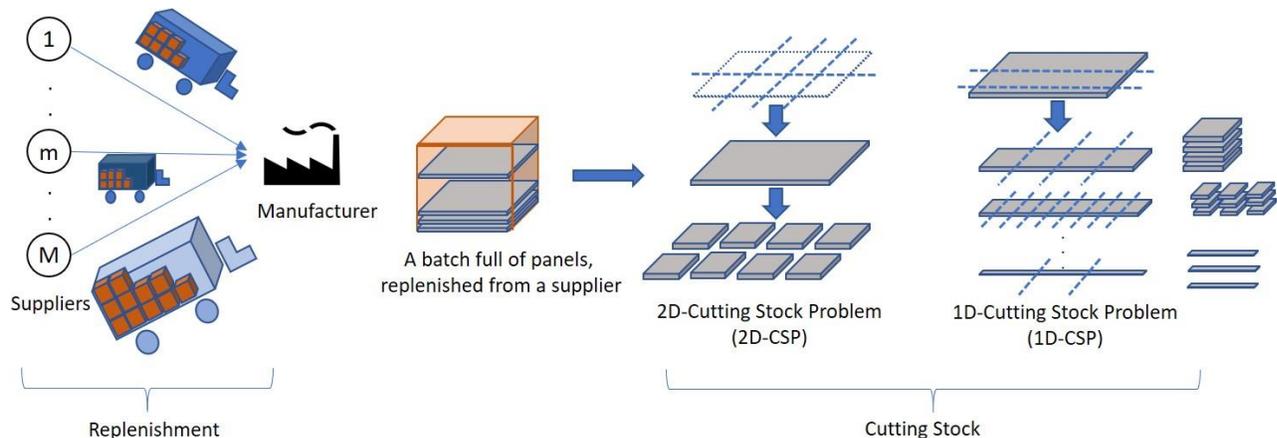


Figure 40. Problème intégré CS-LSP avec approvisionnement des panels rectangulaires transportés dans des batches qui sont chargés dans des véhicules et Cutting Stock 1D et 2D.

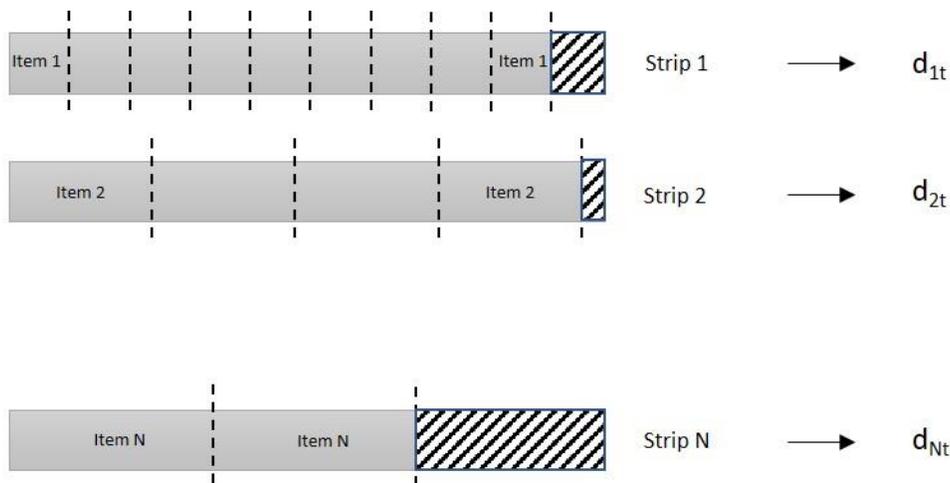
Pour satisfaire une demande client, ou un besoin interne, une entreprise découpe des panels en objets rectangulaires de différentes dimensions. Ces panels sont commandés à différents fournisseurs, l’approvisionnement s’effectuant en palettes (batch) placées dans des véhicules de différentes capacités. Nous souhaitons minimiser les coûts d’approvisionnement, les coûts de stockage des panels et des objets, et les coûts de découpe. Nous étudions ce problème de point de vue théorique.

Melega *et al.* (2018) fournit une revue littérature très récente sur les problèmes couplés de CSP et LSP. Nous avons proposé une formulation en PLNE pour chaque problème 1D et 2D-Cutting Stock (1D : unidimensionnel, 2D : bidimensionnel) couplé avec la partie approvisionnement (LSP). Nous travaillons actuellement sur l’identification de cas spéciaux en faisant des hypothèses simplificatrices pour appréhender

la structure du problème. Dans un second temps, nous allons travailler sur des heuristiques ou sur des méthodes de décompositions et de génération de colonnes. Voici quelques perspectives intéressantes :

Perspective 1. 1DCS-LSP (One-dimensional cutting stock & LSP)

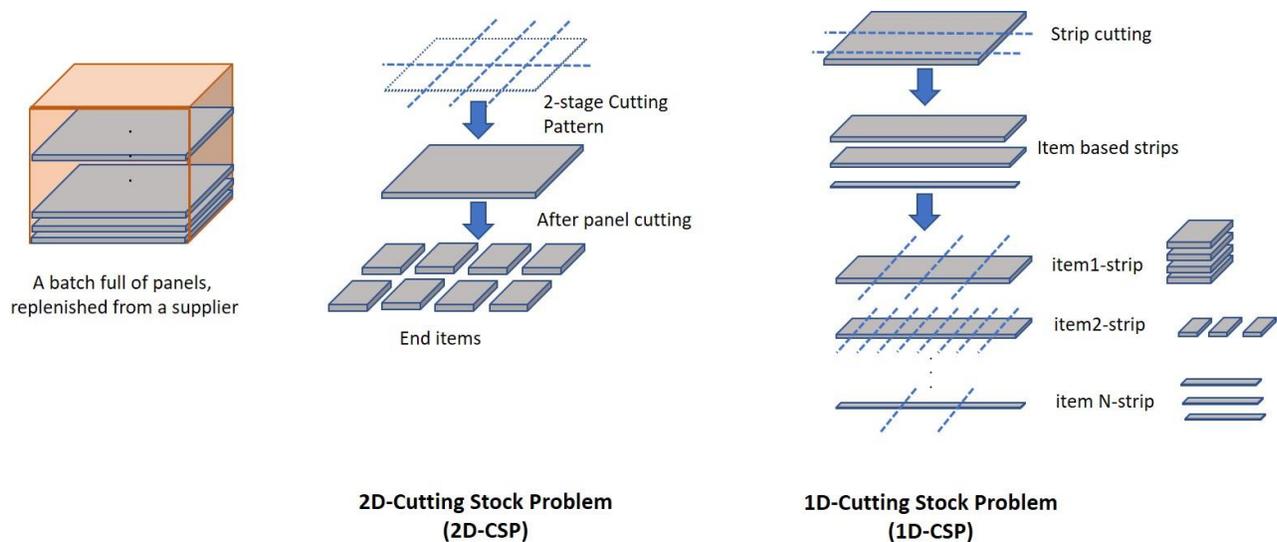
Nous nous intéressons en premier temps au problème Cutting Stock à une dimension, couplé avec le LSP classique sans limitation de capacité de production. Nous ignorons donc la partie approvisionnement par batch en amont. Nous supposons qu'il y a suffisamment de stock de matières premières à découper en début de chaque période. Les matières premières représentent des tiges ou des panels rectangulaires à être découpés. Chaque tige a un schéma de découpe régulier, qui fournit un certain nombre d'objet type i pour lesquels le client passe des commandes. Nous considérons un coût fixe de découpe pour chaque tige i , un coût de setup joint indépendant des types de tiges découpées, un coût de stockage des objets représentant les produits finis i , et un coût unitaire de production pour chaque objet découpé. L'objectif est donc de décider combien de chaque tige faut-il découper à chaque période t afin de satisfaire la demande des clients faite pour chaque objet i , tout en minimisant le coût total.



Nous avons déjà modélisé ce problème sous forme de PLNE et nous avons identifié que le LSP avec production par batch revient à résoudre ce problème de 1D-Cutting Stock multi-période. Notre but maintenant est d'ajouter la partie amont d'approvisionnement des tiges et de voir si les algorithmes en temps polynomial pourraient être étendus pour résoudre ce cas. Nous allons tout d'abord générer des instances faciles à résoudre pour comprendre la structure du problème. Dans la suite nous proposerons des propriétés de dominance pour décrire la solution optimale et enfin les intégrer dans un éventuel algorithme. Nous cherchons également des inégalités valides pour ce problème afin de rendre le PLNE associé plus efficace en termes de temps de résolution. Nous en avons déjà identifié deux classes d'inégalités valides qui nous semblent assez intéressantes pour tailler l'arbre de branchement lors de la procédure de Branch & Cut.

Perspective 2. 2DCS-LSP (Two-dimensional cutting stock & LSP)

Une fois que le cas simple avec une seule dimension aurait été traité, nous allons attaquer le problème en deux dimensions, voir le schéma ci-dessous. Il faudra donc décider simultanément comment découper les panels rectangulaires 2D afin d'obtenir des tiges en 1D et combien de tiges 1D à découper chaque période pour satisfaire la demande pour chaque objet de type i . Comme les coûts de stockage pour les panels rectangulaires, les tiges et les objets découpés ne sont pas pareils, et en plus le coût fixe de découpe est à minimiser, le problème conjoint devient donc très intéressant du point de vue combinatoire. Vu le nombre exhaustif de solutions possibles, il faudrait réfléchir à des méthodes intelligentes et performantes à la fois.



Perspective 3. 1DCSP (One-dimensional cutting stock problem, single period)

Nous ignorons la partie approvisionnement en amont. Ce cas correspond bien au problème classique de Cutting stock sur une seule période où l'objectif est de satisfaire la demande pour un nombre fixé d'objets en fin de la période courante tout en minimisant soit le coût de découpe, soit le nombre de déchets générés, etc. Lorsque le nombre de type d'objets à découper est borné, ce problème peut être résolu en temps polynomial, voir Goemans et Rothvoß (2013). Nous souhaitons traiter ce problème avec l'ajout des stocks à gérer, en début et en fin de période afin de le rendre multi périodes. La différence entre ce problème et celui présenté plus haut (1DCS-LSP) est le schéma de découpe qui peut être beaucoup plus général pour celui-ci. On n'impose pas de découpe régulière pour chaque tige. Plusieurs types d'objets peuvent être découpés à partir d'une seule tige, qui rend le problème un peu plus dur à résoudre. Encore une fois, le problème a des traits très intéressants théoriquement.

Conclusion générale

Lors de la rédaction de ce manuscrit, j'ai eu comme objectif de réaliser un aperçu synthétique de mes travaux de recherche, en donnant uniquement un résumé des problématiques que nous avons traitées avec différents collègues et de nos résultats les plus significatifs. Plus de détails peuvent être trouvés dans mes publications. Si je devais résumer toutes ces années de recherche en quelques phrases, je voudrais placer le problème de dimensionnement de lots (LSP) au premier plan. Tout au long de ma carrière, j'ai travaillé sur plusieurs extensions de ce fameux problème de planification de production et d'approvisionnement, pour essayer de les résoudre efficacement en utilisant divers outils de la Recherche Opérationnelle (RO) et de l'Optimisation Combinatoire (OC). J'ai aussi profité de mes connaissances théoriques pour étudier d'autres problèmes d'optimisation comme le dimensionnement des flottes de véhicules, le problème de découpe, de packing, les problèmes inverses et non linéaires.

Concernant mes activités d'enseignement, j'aime beaucoup m'investir dans des méthodes d'apprentissage ludiques pour partager les connaissances scientifiques avec mes étudiants afin de capter au maximum leur attention lors des cours. J'utilise mes compétences et connaissances acquises dans les outils d'optimisation et l'utilisation des logiciels afin de faire le transfert de ces savoirs dans mes activités d'enseignement. J'essaie de leur montrer un grand nombre de logiciels qui pourront leur servir dans leur future carrière, en faisant des démonstrations en cours et lors des séances de TP. J'introduis également les différentes problématiques industrielles que je rencontre via les stages industriels en partageant les approches développées et les méthodes utilisées. Depuis 2004, qui marque le début de mes activités d'enseignement, j'ai monté plusieurs nouveaux modules avec le souci d'enrichir ma pédagogie par la vulgarisation de mes activités de recherche. Les cours que j'ai montés au niveau Master 1 et Master 2, m'ont permis de faire ce lien entre la recherche et l'enseignement universitaire. Les années postdoctorales, sans enseignement, m'ont montré que les activités de recherche seules n'étaient pas suffisantes pour me rendre pleinement satisfaite. Je me rends compte que j'ai vraiment besoin de ce contact avec les étudiants pour me renouveler, pour diffuser les résultats scientifiques et pour me remettre en permanence en question.

Pour conclure, je peux dire qu'avant de me mettre à rédiger mon habilitation, je ne me rendais pas compte de la multitude de tâches et de projets que j'avais réalisés. Maintenant que je me prépare à mettre le point final, j'avoue que j'en ressens une certaine fierté. Cette fierté scientifique va me motiver encore davantage pour mes futurs projets et me donnera l'énergie nécessaire pour les réaliser au mieux, avec des résultats originaux qui continueront à alimenter le monde de recherche. Je donnerai également toute mon énergie à faire le lien entre ces résultats scientifiques et le monde plus concret, notamment en participant à leur vulgarisation via epiSTEM. En espérant que mes problématiques de recherche vous ouvriront de nouveaux horizons à explorer.

Références

- Absi, N., Detienne, B. & Dauzère-Pérès, S., 2013. Heuristics for the multi-item capacitated lot-sizing problem with lost sales. *Computers & Operations Research*, Volume 40, pp. 264-272.
- Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F. & Jans, R., 2015. The production routing problem: A review of formulations and solution algorithms. *Computers & Operations Research*, Volume 55, pp. 141-152.
- Aggarwal, A. & Park, J., 1993. Improved algorithms for economic lot size problems. *Operations Research*, 41(3), p. 549–571.
- Ahuja, R., Magnanti, T. & Orlin, J., 1993. *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. s.l.:PRENTICE HALL.
- Akbalik, A., 2006. *Optimisation de la gestion intégrée des flux physiques dans une chaîne logistique: extension du problème de dimensionnement de lots*. Grenoble INP: Ph.D Thesis.
- Akbalik, A., Hadj-Alouane, A. & Sauer, N., 2017. NP-hard and polynomial cases for the single-item lot sizing problem with batch ordering under capacity reservation contract. *European Journal of Operational Research*, Volume 257, pp. 483-493.
- Akbalik, A., Kebe, S., Penz, B. & Sbihi, N., 2008. Exact methods and a heuristic for the optimization of an integrated replenishment-storage planning problem. *International Transactions in Operational Research*, 15(2), pp. 195-214.
- Akbalik, A. & Penz, B., 2009. Exact methods for single-item capacitated lot sizing problem with alternative machines and piece-wise linear production costs. *International Journal of Production Economics*, Volume 119, pp. 367-379.
- Akbalik, A. & Penz, B., 2011. Comparison of just-in-time and time window delivery policies for a single-item capacitated lot sizing problem. *International Journal of Production Research*, 49(9), pp. 2567-2585.
- Akbalik, A., Penz, B. & Rapine, C., 2015. Capacitated lot sizing problems with inventory bounds. *Annals of Operations Research*, Volume 229, pp. 1-18.
- Akbalik, A., Penz, B. & Rapine, C., 2015. Multi-item uncapacitated lot sizing problem with inventory bounds. *Optimization Letters*, 9(1), pp. 143-154.
- Akbalik, A. & Pochet, Y., 2009. Valid inequalities for the single-item capacitated lot sizing problem with step-wise costs. *European Journal of Operational Research*, Volume 198, pp. 412-434.

- Akbalik, A. & Rapine, C., 2012. Polynomial time algorithms for the constant capacitated single-item lot sizing problem with stepwise production cost. *Operations Research Letters*, Volume 40, pp. 390-397.
- Akbalik, A. & Rapine, C., 2013. The single item uncapacitated lot-sizing problem with time-dependent batch sizes: NP-hard and polynomial cases. *European Journal of Operational Research*, Volume 229, pp. 353-363.
- Akbalik, A. & Rapine, C., 2018. Lot sizing problem with multi-mode replenishment and batch delivery. *Omega*, Volume 81, pp. 123-133.
- Aksen, D., Altinkemer, K. & Chand, S., 2003. The single-item lot-sizing problem with immediate lost sales. *European Journal of Operational Research*, 147(3), pp. 558-566.
- Akutsu, T., 2011. Optimization in Bioinformatics. *IFORS NEWS*, December.
- Atamturk, A., 2003. On the facets of the mixed-integer knapsack polyhedron. *Mathematical Programming*, Volume 98, p. 145–175.
- Atamturk, A. & Hochbaum, D., 2001. Capacity acquisition, subcontracting and lot-sizing. *Management Science*, Volume 47, pp. 1081-1100.
- Atamturk, A. & Kucukyavuz, S., 2008. An $O(n^2)$ algorithm for lot sizing with inventory bounds and fixed. *Operations Research Letters*, Volume 36, p. 297–299.
- Bertsimas, D. & Sim, M., 2004. The Price of Robustness. *Operations Research*, 52(1), p. 35–53.
- Bertsimas, D. & Thiele, A., 2006. A Robust Optimization Approach to Inventory Theory. *Operations Research*, 54(1), p. 150–168.
- Biel, K. & Glock, C., 2016. Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning. *Computers and Industrial Engineering*, Volume 101, pp. 243-259.
- Bitran, G. R. & Yanasse, H. H., 1982. Computational Complexity of the Capacitated Lot Size Problem. *Management Science*, Volume 28, pp. 1174-1186.
- Brahimi, N., Absi, N., Dauzère-Pérès, S. & Nordli, A., 2017. Single-Item Dynamic Lot-Sizing Problems: An Updated Survey. *European Journal of Operational Research*, 263(3), pp. 838-863.
- Brahimi, N., Dauzère-Pérès, S., Najid, N. M. & Nordli, A., 2006. Single item lot sizing problems. *European Journal of Operational Research*, Volume 168, pp. 1-16.
- Brüggemann, W. & Jahnke, H., 2000. The discrete lot-sizing and scheduling problem: Complexity and modification for batch availability. *European Journal of Operational Research*, 124(3), pp. 511-528.
- Chu, C., Chu, F., Zhong, J. & Yang, S., 2013. A polynomial algorithm for a lot-sizing problem with backlogging, outsourcing and limited inventory. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 64(1), pp. 200-210.

- Coelho, L., Cordeau, J. & Laporte, G., 2014. Thirty Years of Inventory Routing. *Transportation Science*, Volume 48, pp. 1-19.
- DasGupta, B., Konwar, K., Mandoiu, I. & Shvartsman, A., 2005. Highly scalable algorithms for robust string barcoding. *Int. J. Bioinformatics Research and Applications*, Vol. 1, No. 2, 2005, 1(2), pp. 145-161.
- Díaz-Madroñero, M. et al., 2018. *Leveraging Capacity Planning with Maintenance Insights*. Itamambuca, Brazil, IWLS (International Workshop on Lot Sizing).
- Drexl, A. & Haase, K., 1995. Proportional lotsizing and scheduling. *International Journal of Production Economics*, 40((1)), pp. 73-87.
- Ertogral, K., Akbalik, A. & Gonzalez, S., 2017. Modelling and analysis of a strategic fleet sizing problem for a furniture distributor. *European Journal of Industrial Engineering*, 11(1), pp. 49-77.
- Farhat, M., 2019. *Batch replenishment planning under capacity reservation contract*, Ph.D manuscript: Université de Lorraine & Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.
- Farhat, M., Akbalik, A., Sauer, N. & Hadj-Alouane, A., 2019. Lot sizing problem with batch ordering under periodic buyback contract and lost sales. *International Journal of Production Economics*, Volume 208, pp. 500-511.
- Federgruen, A. & Tzur, M., 1991. A simple forward algorithm to solve general dynamic lot sizing models with n periods in $O(n \log n)$ or $O(n)$ time. *Manage Science*, Volume 37, p. 909–925.
- Florian, M. & Klein, M., 1971. Deterministic production planning with concave costs and capacity constraints. *Manage Science*, 18(1), p. 12–20.
- Florian, M., Lenstra, J. K. & Kan, A. H. G. R., 1980. Deterministic Production Planning: Algorithms and Complexity. *Management Science*, Volume 26, pp. 669-679.
- Furini, F., Malaguti, E. & Thomopulos, D., 2016. Modeling Two-Dimensional Guillotine Cutting Problems via Integer Programming. *INFORMS Journal on Computing*, 28(4), pp. 603-799.
- Gahm, C., Denz, F., Dirr, M. & Tuma, A., 2016. Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: a review and research framework. *European Journal of Operational Research*, 248(3), p. 744–57.
- Garey, M. R. & Johnson, D. S., 1979. *Computers and Intractability : A Guide to the Theory of NP-Completeness*. s.l.:W.H.Freeman and Company, New York.
- Goemans, M. & Rothvoß, T., 2013. *Polynomiality for Bin Packing with a Constant Number of Item Types*, <https://arxiv.org/abs/1307.5108v1>: MIT ArXiv, July 22.
- Gutiérrez, J., Sedenó-Noda, A., Colebrook, M. & Sicilia, J., 2007. A polynomial algorithm for the production/ordering planning problem with limited storage. *Computers and Operations Research*, Volume 34, p. 934–937.

- Helmrich, M., Jans, R., van den Heuvel, W. & Wagelmans, A., 2015. The economic lot-sizing problem with an emission capacity constraint. *European Journal of Operational Research*, 241(1), p. 50–62.
- Hou, J., Zeng, A. & L., Z., 2010. Coordination with a backup supplier through buy-back contract under supply disruption. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), pp. 881-895.
- Hwang, H.-C. & van den Heuvel, W., 2012. Improved algorithms for a lot-sizing problem with inventory bounds and backlogging. *Naval Research Logistics*, 59(3-4), p. 244–253.
- Jans, R. & Degraeve, Z., 2008. Modeling industrial lot sizing problems: a review. *International Journal of Production Research*, Volume 46, pp. 1619-1643.
- Karimi, B., Fatemi Ghomi, S. & Wilson, J., 2003. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega*, 31(5), pp. 365-378.
- Koç, Ç., Bektaş, T. & Jabali, O. L. G., 2016. Thirty years of heterogeneous vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 249(1), pp. 1-21.
- Lee, C. & Li, X., 2013. Economic lot sizing: the capacity reservation model. *Operations Research Letters*, Volume 41, pp. 670-674.
- Li, C.-L., Hsu, V. N. & Xiao, W.-Q., 2004. Dynamic lot sizing with batch ordering and truckload discounts. *Operations Research*, Volume 52, pp. 639-654.
- Lippman, S. A., 1969. Optimal inventory policy with multiple set-up costs. *Management Science*, Volume 16, pp. 118-138.
- Lodi, A. & Monaci, M., 2003. Integer linear programming models for 2-staged two-dimensional Knapsack problems. *Mathematical Programming*, 94(2), pp. 257-278.
- Love, S., 1973. Bounded production and inventory models with piecewise concave costs. *Management Science*, 20(3), p. 313–318 .
- Melega, G., de Araujo, S. & Jans, R., 2018. Classification and literature review of integrated lot-sizing and cutting stock problems. *European Journal of Operational Research*, 271(1), pp. 1-19.
- Molina, F., Santos, M., Toledo, F. & Araujo, S., 2009. An approach using Lagrangean surrogate relaxation for lot-sizing with transportation costs. *Pesquisa Operacional*, 28(2), pp. 269-288.
- Ng, C., Kovalyov, M. & Cheng, T., 2010. A simple FPTAS for a single-item capacitated economic lot-sizing problem with a monotone cost structure. *European Journal of Operational Research*, Volume 200, p. 621–624.
- Olivera, A. & Viera, O., 2007. Adaptive memory programming for the vehicle routing problem with multiple trips. *Computers & Operations Research*, 34(1), pp. 28-47.

- Ostermeier, M. & Hübner, A., 2018. Vehicle selection for a multi-compartment vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, Volume 269, p. 682–694.
- Ou, J. & Feng, J., 2019. Production lot-sizing with dynamic capacity adjustment. *European Journal of Operational Research*, 272(1), pp. 261-269.
- Padberg, M., van Roy, T. & Wolsey, L., 1985. Valid linear inequalities for fixed charge problems. *Operations Research*, Volume 33, p. 842–861.
- Pasternack, B., 1985. Optimal pricing and returns policies for perishable commodities. *Marketing Science*, 4(2), pp. 166-176.
- Pedroso, J., 2020. Heuristics for packing semifluids. *European Journal of Operational Research*, 282(3), pp. 823-834.
- Pochet, Y. & Wolsey, L., 1993. Lot-sizing with constant batches: Formulation and valid inequalities. *Mathematics of Operations Research*, 18(4), pp. 767-785.
- Pochet, Y. & Wolsey, L., 2006. *Production Planning by Mixed Integer Programming*. s.l.:Springer.
- Rapine, C., Goisque, G. & Akbalik, A., 2018. Energy-aware lot sizing problem: Complexity analysis and exact algorithms. *International Journal of Production Economics*, Volume 203, pp. 254-263.
- Rapine, C., Penz, B., Gicquel, C. & Akbalik, A., 2018. Capacity acquisition for the single-item lot sizing problem under energy constraints. *Omega*, Volume 81, pp. 112-122.
- Sedeno-Noda, A., Gutiérrez, J., Abdul-Jalbar, B. & Sicilia, J., 311–323. An $O(T \log(T))$ algorithm for the dynamic lot size problem with limited storage and linear costs. *Comput. Optim. Appl.*, Volume 28, p. 2004.
- Toczyłowski, E., 1995. An $O(T^2)$ algorithm for the lot-sizing problem with limited inventory levels. *IEEE Symp. Emerg. Technol. Factory Autom.*, Volume 3, p. 78–85.
- Tortai, J., Akbalik, A., Soulan, S. & Schiavone, P., 2010. Inverse problem solving and optical index determination of resist films by ellipsometry. *Microelectronic Engineering*, Volume 87, pp. 893-898.
- Tortai, J., Trouvé, H., Akbalik, A. & Soulan, S., 2009. UV impact on the optical properties of thin films of positive tone chemically amplified resist. *Microelectronic Engineering*, 86(4-6), pp. 800-802.
- van Hoesel, C. & Wagelmans, A., 1996. An $O(T^3)$ Algorithm for the Economic Lot-Sizing Problem with Constant Capacities. *Management Science*, 42(1), pp. 142-150.
- van Hoesel, C. & Wagelmans, A., 2001. Fully polynomial approximation schemes for single-item capacitated economic lot-sizing problems. *Mathematics of Operations Research*, Volume 26, p. 339–357.
- van Norden, L. & Van de Velde, S., 2005. Multi-product lot-sizing with a transportation capacity reservation contract. *European Journal of Operational Research*, Volume 165, pp. 127-138.

- van Vyve, M., 2007. Algorithms for single-item lot-sizing problems with constant batch size. *Mathematics of Operations Research*, 32(3), pp. 594-613.
- Vanderbeck, F., 1998. Lot-sizing with start-up times. *Management Science*, 44(10), pp. 1409-1425.
- Wagelmans, A. P. M., Hoesel, S. & Kolen, A., 1992. Economic lot sizing: an $O(n \log n)$ algorithm that runs in linear time in the Wagner-Whitin case. *Operations Research*, 40(1), pp. S145--S156.
- Wagner, H. M. & Whitin, T. M., 1958. Dynamic Version of the Economic Lot Size Model. *Management Science*, Volume 5, pp. 89-96.
- Wichmann, M., Johannes, C. & Spengler, T., 2019. Energy-oriented Lot-Sizing and Scheduling considering energy storages. *International Journal of Production Economics*, Volume 216, pp. 204-214.
- Wu, S., Erkoc, M. & Karabuk, S., 2005. Managing capacity in the high-tech industry: a review of literature. *The Engineering Economist*, Volume 50, pp. 125-158.
- Zhengyang, H. & H., G., 2020. Hybrid stochastic and robust optimization model for lot-sizing and scheduling problems under uncertainties,. *European Journal of Operational Research* , Volume 284, pp. 485-497.

ANNEXES

Annexe 1. Tableau tiré de la source Brahim *et al.* (2017), EJOR « Single-item dynamic lot-sizing problems: An updated survey »

Positionnement de nos quelques travaux de recherche dans l'état de l'art du LSP mono-item, balayant les résultats les plus significatifs publiés entre 2004-2016.

| Class/subclass | Complexity | Dynamic programming | Polyhedral/MIP/B&C | B&B and dual | |
|--|--|---|---|---|--|
| Constraints on resources Production capacity | (Akbalik & Penz, 2009), Agra and Constantino (1999)*, Baciarello, D'Avino, Onori, and Schiraldi (2013)*, | (Akbalik & Penz, 2009; Akbalik & Rapine, 2012; Berk, Toy, & Hazir, 2008; Chen, Feng, & Lin, 2008), Akbalik and Penz (2009)*, (Chubanov, Kovalyov, & Pesch, 2006; 2008; Chubanov & Pesch, 2012), Akbalik and Rapine (2012)*, Akbalik and Rapine (2013)*, (Feng, Chen, Kumar, & Lin, 2011b), Bahl, Ritzman, and Gupta (1987)*, (Kovalyov & Pesch, 2014), Chan, Muriel, Shen, and Simchi-Levi (2002)*, (Merzifonluoglu, Geunes, & Romeijn, 2007; Ng, Kovalyov, & Cheng, 2010; Okhrin & Richter, 2011b; Ou, 2012; Pan, Tang, & Liu, 2009; Pochet & Wolsey, 1993), Elmaghraby and Keskinocak (2003)*, (van den Heuvel & Wagelmans, 2006a; Toy & Berk, 2006), Fleischmann (1990)*, Feng, Rao, and Raturi (2011a)*, (van Hoesel, Romeijn, Morales, & Wagelmans, 2005), Feng, Chen, Kumar, and Lin (2011b)*, (van Vyve, 2007; Zangwill, 1966) | (Akbalik & Penz, 2009; Akbalik & Pochet, 2009; Atamtürk & Muñoz, 2004), Adulyasak, Cordeau, and Jans (2015b)*, (Brahimi & Khan, 2014; Coleman & McKnew, 1995; Di Summa & Wolsey, 2010; Hardin, Nemhauser, & Savelsbergh, 2007), Brahim, Dauzère-Pérès, Najid, and Nordli (2006)*, (Loparic, Marchand, & Wolsey, 2003), Chu, Chu, Zhong, and Yang (2013)*, (Pochet & Wolsey, 1993), (van Vyve, 2006; Yilmaz & Çatay, 2006; Zhang, Jiang, & Pan, 2012b) | (Akbalik & Penz, 2009; Akbalik & Pochet, 2009; Atamtürk & Muñoz, 2004), Adulyasak, Cordeau, and Jans (2015b)*, (Brahimi & Khan, 2014; Coleman & McKnew, 1995; Di Summa & Wolsey, 2010; Hardin, Nemhauser, & Savelsbergh, 2007), Brahim, Dauzère-Pérès, Najid, and Nordli (2006)*, (Loparic, Marchand, & Wolsey, 2003), Chu, Chu, Zhong, and Yang (2013)*, (Pochet & Wolsey, 1993), (van Vyve, 2006; Yilmaz & Çatay, 2006; Zhang, Jiang, & Pan, 2012b) | Absi, Dauzère-Pérès, Kedad-Sidhoum, Penz, and Rapine (2013)*, Akbalik and Rapine (2013), (Erenguc & Aksoy, 1990; Hardin, Nemhauser, & Savelsbergh, 2007), Chan, Muriel, Shen, and Simchi-Levi (2002)*, |
| Inventory constraints | | (Akbalik, Penz, & Rapine, 2015; Atamtürk & Küçükyavuz, 2008; Chu, Chu, Zhong, & Yang, 2013), Benli, Sabuncuoglu, and Tufekci (1988)*, (Huang, Zhong, Ni, & Yang, 2008; Hwang & van den Heuvel, 2012; Hwang, van den Heuvel, & Wagelmans, 2013; Jaruphongsa, Çetinkaya, & Lee, 2004; Liu, 2008; Loparic, Pochet, & Wolsey, 2001), Chan, Shen, Simchi-Levi, and Swann (2004)*, (Önal, van den Heuvel, & Liu, 2012; Toczyłowski, 1995) | (Atamtürk & Küçükyavuz, 2005; Di Summa & Wolsey, 2010; Loparic, Pochet, & Wolsey, 2001; Yang, Wee, Chung, & Ho, 2010) | (Erenguc & Aksoy, 1990) | |

| Class/subclass | Complexity | Dynamic programming | Polyhedral/MIP/B&C |
|---|--|---|---|
| Perishable inventories | | Bahl and Neelam (2009)*, Bitran and Yanasse (1982)*, (Önal, Romeijn, Sapra, & van den Heuvel, 2015), [86*] | |
| Constraint on lot sizes | (Absi, Dauzère-Pérès, Kedad-Sidhoum, Penz, & Rapine, 2016; Akbalik & Rapine, 2013) | (Akbalik & Rapine, 2012), (Anderson & Cheah, 1993; Okhrin & Richter, 2011b; Pochet & Wolsey, 1993; van Vyve, 2007) | (Akbalik & Pochet, 2009; Park & Klabjan, 2015; Pochet & Wolsey, 1993) |
| Outsourcing | | (Chu, Chu, Zhong, & Yang, 2013; Huang, Zhong, Ni, & Yang, 2008; Merzifonluoglu, Geunes, & Romeijn, 2007; Wang, He, Sun, Xie, & Shi, 2011) | (Merzifonluoglu, Geunes, & Romeijn, 2007) |
| Complex Structure Multi-echelon | (Arkin, Joneja, & Roundy, 1989) | (Denizel, Solyali, & Süral, 2010; Kaminsky & Simchi-Levi, 2003), Brahimi and Dauzère-Pérès (2015)*, (van Hoesel, Romeijn, Morales, & Wagelmans, 2005; Melo & Wolsey, 2010; Zangwill, 1969; Zhang, Kucukyavuz, & Yaman, 2012a) | (Brahimi & Khan, 2014; Egri, Kis, Kovács, & Váncza, 2014; Senoussi, Mouss, Penz, Brahimi, & Dauzère-Pérès, 2016),(Yang, Wee, Chung, & Ho, 2010), (Yilmaz & Çatay, 2006) |
| Multi-sourcing | (Absi, Dauzère-Pérès, Kedad-Sidhoum, Penz, & Rapine, 2013; Akbalik & Penz, 2009) | (Absi, Dauzère-Pérès, Kedad-Sidhoum, Penz, & Rapine, 2013), (Akbalik & Penz, 2009; Akbalik & Rapine, 2013), (de Toledo & Shiguemoto, 2005) | (Akbalik & Penz, 2009) |
| Class/subclass | Complexity | Dynamic programming | Polyhedral/MIP/B&C |
| Cost Structure | | (Akbalik & Rapine, 2012; Atamtürk & Küçükyavuz, 2008; Berk, Toy, & Hazir, 2008; Kian, Ülkü Gürler, & Berk, 2014), (Kovalyov & Pesch, 2014), Chan, Muriel, Shen, and Simchi-Levi (2002)*, (Ng, Kovalyov, & Cheng, 2010) | |
| Other costs | | (Berk, Toy, & Hazir, 2008; Toy & Berk, 2006), Fleischmann (1990)*, (Zangwill, 1966) | (Agra & Constantino, 1999; Coleman & McKnew, 1995; Escalante, Marenco, & del Carmen Varaldo, 2011; van Hoesel, Wagelmans, & Wolsey, 1994a; Wolsey, 1989) |
| Co-production Others | (Akbalik & Rapine, 2013; Hsu & Lowe, 2001) | (Agrali, 2012) (Absi, Kedad-Sidhoum, & Dauzère-Pérès, 2011; Akbalik & Rapine, 2013; Berk, Toy, & Hazir, 2008), (Chubanov, Kovalyov, & Pesch, 2008; Hsu & Lowe, 2001) | (Agrali, 2012) |