Université Paris-Panthéon-Assas

ÉCOLE DOCTORALE D'ÉCONOMIE, GESTION, INFORMATION ET COMMUNICATION (EGIC) (ED 455)

Thèse de doctorat en Sciences de gestion
Soutenue le 10 juillet 2025

Thèse de Doctorat / 10 juillet 2025

Proposition d'une approche intégrée des activités de transports et de production dans la supply chain minière



Auteur : SIDKI Mouad

Laboratoire en sciences de gestion Panthéon Assas (LARGEPA) ;

EMINES School of Industrial Management – Université Mohammed VI Polytechnique

Sous la direction de :

Pierre FÉNIÈS	Professeur à l'Université Paris-Panthéon-Assas, France
Nikolay TCHERNEV	Professeur à l'Université Clermont Auvergne, France
Selwa EL FIRDOUSSI	Professeur à l'Université Mohammed VI Polytechnique, Maroc

Président du jury :

Thierry FOUQUE	Professeur à l'Université Paris Nanterre, France

Rapporteurs :

Frédéric GAUTIER	Professeur à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, France
Philippe LACOMME	Professeur à l'Université Clermont Auvergne, France

Suffragants :

Asma RAKIZ	Maître de Conférences à l'Université Paris Nanterre, France
Libo REN	Professeur à l'Université Paris-Panthéon-Assas, France
Nicolas CHEIMANOFF	Professeur à l'Université Mohammed VI Polytechnique, Maroc

Avertissement

La Faculté n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse.

Remerciements

Je voudrais exprimer mes plus profonds remerciements à mes directeurs de thèse, Professeur Nikolay TCHERNEV et Pierre FÉNIÈS, pour leur engagement et leur soutien constants tout au long de cette thèse. J'ai vivement apprécié leurs conseils et la confiance qu'ils m'ont accordée pour explorer, parfois me tromper et pouvoir améliorer mes connaissances ainsi que mon raisonnement. Je remercie également ma co-directrice, Professeure Selwa EL FIRDOUSSI, et Professeur Libo REN pour leurs précieuses suggestion, les ressources et le temps qu'ils ont investis dans ce travail de recherche. De plus, je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude au Professeur Nicholas Cheimanoff pour sa confiance et son soutien tout au long de mon parcours académique à l'EMINES.

Je souhaite également remercier M. Nabil ATLASSI, ancien Directeur de la Planification et de la Performance sur le site minier de Khouribga du Groupe OCP, ainsi que toute l'équipe de planification de Khouribga pour leur engagement envers mon sujet de recherche.

Enfin, je ne saurais exprimer toute ma gratitude envers ma famille pour leur soutien inconditionnel. Je remercie également mes amis avec qui j'ai partagé cette aventure.

Proposition d'une approche intégrée des activités de transports et de production dans la supply chain minière

Résumé :

L'industrie minière est un pilier du développement industriel, soutenant des secteurs vitaux tels que la construction, l'industrie manufacturière, la technologie et l'agriculture. En particulier, l'industrie du phosphate est essentielle à l'agriculture et à la production alimentaire, assurant la sécurité alimentaire mondiale pour une population en constante croissance. Son impact économique dépasse l'agriculture, contribuant de manière significative aux économies des pays riches en phosphates tels que le Maroc. Motivée par la chaîne de valeur intégrée de production de phosphate et de distribution par réseau de pipeline de l'axe nord du Groupe OCP, cette thèse de doctorat, menée à l'Université Paris-Panthéon-Assas et à EMINES-School of Industrial Management, étudie des solutions opérationnelles pratiques pour l'ordonnancement de la production des laveries, du transport par pipeline et la gestion des stocks multiproduits. La recherche est motivée par la nécessité de remplacer les méthodes d'ordonnancement manuelles, généralement basées sur des feuilles de calcul, qui peuvent manquer de vision et être sujettes aux erreurs humaines.

Cette thèse s'appuie sur une analyse bibliométrique et une revue systématique de la littérature concernant l'ordonnancement des pipelines multiproduits, en se concentrant sur les travaux publiés de l'an 2000 à 2023. L'analyse bibliométrique utilise trois bases de données bibliographiques scientifiques réputées pour arriver à une compréhension générale de l'évolution de la recherche, des thèmes clés, des auteurs et des revues pertinents, ainsi que de la répartition géographique des affiliations des auteurs. Les articles pertinents ont été examinés à l'aide d'un protocole de recherche structuré, qui classe la littérature en thèmes communs, offrant une compréhension approfondie de l'état actuel du domaine et mettant en évidence des directions prometteuses pour les recherches futures.

La thèse présente trois solutions différentes pour l'ordonnancement intégré de la production des laveries, l'ordonnancement du transport par réseau de pipelines et la gestion des stocks multiproduits. Premièrement, un modèle de programmation linéaire mixte à variables entières (MILP) monolithique, basé sur les lots et à temps continu, a été développé avec l'objectif de créer un plan d'ordonnancement couvrant toutes les opérations détaillées de la chaîne de valeur, en maximisant l'utilisation des pipelines et en respectant les contraintes opérationnelles. Le modèle MILP a été évalué en utilisant des instances de jeux de données réelles provenant de la chaîne de valeur de l'OCP ; les résultats expérimentaux démontrent son efficacité à fournir des solutions optimales et quasi-optimales dans un temps CPU raisonnable.

Deuxièmement, une approche heuristique, basée sur la simulation à événements discrets pour l'ordonnancement détaillé des opérations, a été proposée et évaluée via une étude de cas réelle sous différents scénarios, sur un horizon de deux semaines. Les résultats démontrent que l'approche fournit des solutions d'ordonnancement satisfaisantes dans un temps CPU raisonnable. De plus, cette heuristique donne des résultats satisfaisants après huit mois de fonctionnement dans des conditions réelles.

Troisièmement, une nouvelle approche MILP, basée sur un horizon roulant pour l'ordonnancement dynamique détaillé, a été développée. Les principaux objectifs sont de réduire les ruptures totales de produits et de minimiser la quantité d'eau injectée dans les pipelines. Enfin, une procédure de post-traitement, basée sur un autre modèle MILP a été modélisée pour minimiser les changements d'état dans plusieurs unités, affinant ainsi les solutions d'ordonnancement et les rendant directement applicables en conditions réelles. La solution a été testée à l'aide de données réelles, provenant de la chaîne de valeur de l'OCP ; les résultats démontrent son efficacité à fournir des solutions de haute qualité dans un temps CPU raisonnable.

Descripteurs : industrie du phosphate, chaîne de valeur intégrée, pipelines multiproduits, production, gestion des stocks, ordonnancement des opérations, analyse bibliométrique, revue systématique de la littérature, modèle MILP, heuristiques, simulation à événements discrets

Integrated approach to production and pipeline transportation in the mining supply chain

Abstract:

The mining industry is a cornerstone of industrial development, supporting vital sectors such as construction, manufacturing, technology, and agriculture. The phosphate industry, in particular, is essential for agriculture and food production, ensuring global food security for the continuously growing global population. Its economic impact extends beyond agriculture, contributing significantly to the economies of phosphate-rich countries, such as Morocco. Motivated by the OCP Group's North Axis integrated phosphate production and pipeline distribution supply chain, this doctoral thesis, conducted at Paris-Panthéon-Assas University and EMINES-School of Industrial Management, seeks practical operational solutions for washing stations production scheduling, pipeline transportation scheduling, and multiproduct inventory management. The research is driven by the need to replace manual scheduling methods, typically reliant on spreadsheets, which can be shortsighted and prone to human error.

This thesis is supported by a bibliometric analysis and systematic literature review on multiproduct pipeline scheduling, focusing on works published between 2000 and 2023. The bibliometric analysis utilizes three reputable bibliographic databases to gain a general understanding of the research evolution, key themes, relevant authors, and journals, as well as the country-wise distribution of authors' affiliations. Relevant articles were systematically reviewed using a developed research framework that classifies this literature into common themes, providing a comprehensive understanding of the field's current state and highlighting promising directions for future research.

The thesis presents three different solutions for integrated washing stations production scheduling, pipeline network transportation scheduling, and multiproduct inventory management. Firstly, a monolithic batch-centric, continuous-time mixed-integer linear programming model has been developed with the objective of creating a scheduling plan for all detailed operations in the supply chain while maximizing the use of pipelines for product transportation and adhering to operational constraints. The proposed MILP model was evaluated using real dataset instances from OCP's supply chain, and the experimental results demonstrate its efficiency in providing optimal and near-optimal solutions within a reasonable CPU time.

Secondly, a discrete event simulation-based heuristic approach for the detailed scheduling of the integrated supply chain's operations has been developed and evaluated using a real-world case study under different scenarios over a horizon of two weeks. The experimental results show that the proposed approach provides desirable scheduling solutions within a reasonable CPU time. Moreover, the proposed heuristic yields satisfactory results after eight months of operation under real-world conditions.

Thirdly, a novel mixed-integer linear programming solution framework based on a rolling horizon approach for the detailed dynamic scheduling of the supply chain's operations has been developed. The primary objectives of this framework are to reduce total product shortages and minimize the quantity of water injected into the pipelines. Additionally, a post-processing MILP-based procedure has been developed to minimize state changes across multiple units, thereby refining

scheduling solutions and making them directly applicable in real-world operations. The proposed solution framework was tested using real dataset instances from OCP's supply chain, and the experimental results demonstrate its effectiveness in providing high-quality solutions within a reasonable CPU time.

Keywords: phosphate industry, integrated supply chain, multiproduct pipelines, production, inventory management, operations scheduling, bibliometric analysis, systematic literature review, MILP model, heuristics, discrete event simulation

Principales abréviations

SA	Simulated Annealing
ACO	Ant Colony Optimization
BPL	Bone Phosphate of Lime
CLP	Constraint Logic Programming
CODP	Customer Order Decoupling Point
CP	Constraint Programming
ERP	Enterprise Resource Planning
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
MINLP	Mixed-Integer Nonlinear Programming
MTF	Make to Forecast
MTO	Make to Order
MTS	Make to Stock
PSS	Planning and Scheduling Systems
SCM	Supply Chain Management

Liste des figures

Figure 1.1. Aperçu de la Supply Chain du Groupe OCP (OCP Sustainably report 2020) 36

Figure 1.2. Flux physique de la Supply Chain de l'axe Nord du Groupe OCP 38

Figure 1.3. Chaîne de production et de distribution intégrée étudiée 41

Figure 2.1. Protocole de recherche 53

Figure 2.2. Répartition des articles par année de publication 54

Figure 2.3. Répartition des articles par type 55

Figure 2.4. Fréquence d'utilisation des mots-clés 56

Figure 2.5. Répartition des articles par sources 56

Figure 2.6. Auteurs les plus contributifs 57

Figure 2.7. Répartition par pays du dataset des articles 58

Figure 2.8. Cadre d'analyse 60

Figure 2.9. Un pipeline droit avec une source et une destination 66

Figure 2.10. Un pipeline droit avec plusieurs sources et destinations 67

Figure 2.11. Un réseau de pipelines en arbre à deux niveaux 68

Figure 2.12. Un réseau de pipelines en maille 69

Figure 3.1. Vue schématique de la chaîne de valeur intégrée de la production et de la distribution 99

Figure 3.2. Décomposition du temps d'ordonnancement pour les opérations de chargement à la station de tête 107

Figure 3.3. Exemple des calculs de lwq, a, k et $lbwq, a, k$ 109

Figure 3.4. Initialisation des lots IOn présents dans le pipeline n à $t1 = 0$ 111

Figure 3.5. Valeurs moyennes des fonctions objectifs pour les cas où $PM = 3$ 129

Figure 3.6. Courbes de convergence 130

Figure 3.7. Ordonnancement détaillée des opérations pour l'instance 1 131

Figure 3.8. Niveaux de stock des bacs pour l'instance 1 132

Figure 4.1. Vue d'ensemble schématique de la chaîne d'approvisionnement intégrée de production et de distribution 135

Figure 4.2. Exemple d'ordonnancement d'une laverie w de type 1 155

Figure 4.3. Solution d'ordonnancement obtenue pour le scénario 1 174

Figure 4.4. Solution d'ordonnancement obtenue pour le scénario 2 175

Figure 4.5. Variations des niveaux de stockage de HSL, HSE, TSL et TSE pour le scénario 1 176

Figure 4.6. Variations des niveaux de stockage de HSL, HSE, TSL et TSE pour le scénario 2 177

Figure 5.1. Aperçu schématique du problème d'ordonnancement 181

Figure 5.2. Décomposition de l'horizon glissant 188

Figure 5.3. Organigramme de la solution d'ordonnancement 189

Figure 5.4. Décomposition d'un segment de l'horizon glissant 190

Figure 5.5. Exemple de $cn, i, t - TTn - j = 1$, $zs, t, j = 1$ et $ds, i, t = 1$ 192

Figure 5.6. Aperçu schématique de la décomposition de l'horizon d'ordonnancement du pipeline n 194

Figure 5.7. Évolution des valeurs moyennes de la fonction objectif par rapport à sa moyenne en 5 minutes pour les problèmes du jour 4 213

Figure 5.8. Niveaux de stock avant et après le post-traitement 215

Figure 5.9. Ordonnancement détaillé des opérations pour l'instance 1 216

Figure 5.10. Ordonnancement détaillé des opérations pour l'instance 5 216

Figure 5.11. Niveaux de stock des bacs pour l'instance 1 217

Figure 5.12. Niveaux de stock des bacs pour l'instance 5 218

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Grille d'analyse des articles de la revue systématique de la littérature .. 61

Tableau 3.1. Volumes et débits des pipelines 122

Tableau 3.2. Débits des laveries..... 123

Tableau 3.3. Nombre de nouveaux lots dans les pipelines..... 123

Tableau 3.4. Niveaux de stock maximum et minimum autorisés dans les bacs 123

Tableau 3.5. Tailles maximales et minimales des lots dans les pipelines 124

Tableau 3.6. Décisions autorisées dans les pipelines et laveries et produits autorisés dans les bacs 124

Tableau 3.7. Produits autorisés à être transportés consécutivement dans un pipeline 125

Tableau 3.8. Quantité totale de la demande 125

Tableau 3.9. Quantité de stock initial des bacs et produits initialement stockés..... 126

Tableau 3.10. Lots initiaux dans les pipelines 126

Tableau 3.11. Résultats numériques 127

Tableau 4.1. Ensemble de données relatives aux pipelines..... 168

Tableau 4.2. Ensemble de données relatives aux laveries 168

Tableau 4.3. Ensemble de données relatives aux bacs de stockage 168

Tableau 4.4. Ensemble de données pour l'ordonnancement des lots 169

Tableau 4.5. Ensemble de données relatives à l'état initial des pipelines 170

Tableau 4.6. Ensemble de données relatives aux produits 171

Tableau 4.7. Demande du produit local par jour sur l'horizon d'ordonnancement (m^3) 172

Tableau 4.8. Périodes de maintenance préventive des laveries 172

Tableau 4.9. Ensemble de données relatives à l'état initial des pipelines 172

Tableau 4.10. Ensemble de données relatives aux produits 173

Tableau 4.11. Demande du produit local par jour sur l'horizon d'ordonnancement (m^3) 173

Tableau 5.1. Paramètres des pipelines 206

Tableau 5.2. Débits de production des laveries (m^3) 207

Tableau 5.3. Niveaux de stock maximum et minimum autorisés dans les bacs (m^3) 207

Tableau 5.4. Décisions autorisées dans les pipelines et les laveries 208

Tableau 5.5. Durées minimales des décisions d'ordonnancement dans les laveries et les pipelines en nombre de périodes 208

Tableau 5.6. Produits autorisés dans les bacs 208

Tableau 5.7. Débit de demande journalier pour le produit $P1$ en m^3/h 209

Tableau 5.8. Produits initiaux dans les bacs et niveau de stock en m^3 210

Tableau 5.9. Lots initiaux dans le pipeline principal $n3$ 210

Tableau 5.10. Heures de début des maintenances et durées en heures 211

Tableau 5.11. Résultats numériques 212

Tableau 5.0.12. Résultats des solutions de post-traitement 214

Tableau 6.1. Apports académiques et managériaux 224

Liste des algorithmes

Algorithme 4.1. Heuristique basée sur la simulation 142

Algorithme 4.2. Scheduling_plan_initalization 144

Algorithme 4.3. System_state_initialization 145

Algorithme 4.4. All_transport_time_estimation 145

Algorithme 4.5. Transport_time_proc 146

Algorithme 4.6. Storage_update 148

Algorithme 4.7. Local_product_scheduling 149

Algorithme 4.8. WS_selection_for_P1 152

Algorithme 4.9. WS_scheduling 154

Algorithme 4.10. Pipeline_scheduling 159

Algorithme 4.11. PL_batch_updating 160

Algorithme 4.12. PL_new_batch_scheduling 161

Algorithme 4.13. DTSP_scheduling 162

Algorithme 4.14. Export_products_scheduling 164

Algorithme 4.15. FP_scheduling 165

Sommaire

Thèse de Doctorat / 10 juillet 2025 1

Introduction 20

Chapitre 1 : Préliminaires 28

1. Introduction 28

2. Gestion de la Supply Chain 28

2.1. Définitions et évolution 28

2.2. Flux dans les Supply Chains 30

2.3. Niveaux de prise de décision 32

2.4. Stratégies de production 33

3. Introduction au problème 35

3.1. Contexte industriel 35

3.2. Problème de recherche 40

4. Approches de solution 44

4.1. Programmation linéaire en nombres entiers mixtes 44

4.2. Approches heuristiques 45

4.3. Simulation à événements discrets 47

5. Conclusion 49

Chapitre 2 : Ordonnancement des pipelines multiproduits : Une analyse bibliométrique approfondi et une revue systématique de la littérature 50

1. Introduction 50

2. Analyse bibliométrique 52

3. Revue systématique de la littérature 59

3.1. Méthodologie 59

3.2. Le domaine d'étude 65

3.3. La topologie des systèmes de pipelines 66

3.4. Précision de l'ordonnancement 69

3.5. Environnement déterministe VS incertain 71

3.5.1 Environnement déterministe ____ 71

3.5.2. Environnement incertain ____ 72

3.6. Contraintes opérationnelles ____ 73

3.6.1. Production ____ 74

3.6.2. Demande ____ 75

3.6.3. Formulation des lots ____ 77

3.6.4. Arrêts et maintenance ____ 78

3.6.5. Débit réversible ____ 80

3.6.6. Nœuds à double utilité ____ 81

3.6.7. Gestion de la contamination ____ 82

3.6.8. Gestion des stocks ____ 83

3.7. Formulations de Temps et de Volume ____ 85

3.7.1. Formulation du temps ____ 85

3.7.2. Formulation du volume ____ 87

3.8. Stratégies de solution ____ 88

3.8.1. Modèles mathématiques ____ 88

3.8.2. Programmation par contraintes ____ 89

3.8.3. Algorithmes heuristiques ____ 90

3.8.4. Algorithmes méta-heuristiques ____ 90

3.8.5. Modèles de simulation ____ 91

3.8.6. Approches basées sur les données ____ 91

3.8.7. Approches de prétraitement et de décomposition ____ 92

3.9. Objectifs d'ordonnancement ____ 92

4. Discussion ____ 94

5. Conclusion ____ 96

Chapitre 3 : Une approche MILP monolithique centrée sur les lots pour un problème réel d'ordonnancement intégré de la production et de la distribution de phosphate____ 97

1. Introduction____ 97

2. Modèle mathématique ____ 103

2.1. Nomenclature ____ 103

2.2. Fonction objectif ____ 106

2.3. Contraintes temporelles ____ 106

2.4. Laveries ____ 108

2.5. Contraintes de volumes et d'allocation des produits ____ 110

2.6. Suivi des lots dans les pipelines ____ 112

2.7. Opérations de pipeline : processus de chargement et de déchargement ____ 114

2.8. Opération de transfert ____ 117

2.9. Contraintes de demande à la station terminale ____ 118

2.10. Contraintes liées à la gestion des stocks ____ 118

3. Expérimentations numériques ____ 121

3.1. Instances ____ 121

3.2. Résultats numériques ____ 127

3.2.1. Choix du paramètre KM ____ 128

3.2.2. Convergence du modèle MILP ____ 129

3.2.3. Décisions d'ordonnancement pour l'instance 1 ____ 130

4. Conclusion ____ 133

Chapitre 4 : Approche heuristique pour un problème réel d'ordonnancement intégré de la production et de la distribution ____ 134

1. Introduction ____ 134

1.1. Contexte de recherche ____ 134

1.2. Définition du problème et hypothèses ____ 136

1.3. Organisation du chapitre ____ 140

2. Heuristique basée sur la simulation ____ 141

2.1. Étape d'initialisation ____ 143

2.2. Ordonnancement du produit local ____ 148

2.2.1. Sélection des laveries pour le produit local ____ 151

2.2.2. Ordonnancement des laveries et des pipelines secondaires _____ 153

2.2.3. Ordonnancement des opérations dans les pipelines _____ 157

2.2.4. Ordonnancement des pipelines à la station terminale _____ 161

2.3. Ordonnancement des produits d'export _____ 163

3. Expériences numériques _____ 166

3.1. Étude de cas et génération de scénarios _____ 166

3.1.1. Données de l'instance du scénario 1 _____ 170

3.1.2. Données de l'instance du scénario 2 _____ 172

3.2. Résultats des scénarios _____ 173

3.2.1. Résultats pour le scénario 1 _____ 173

3.2.2. Résultats pour le scénario 2 _____ 174

4. Conclusion _____ 178

Chapitre 5 : Une approche originale basée sur un MILP à horizon glissant centré sur les produits pour un problème réel d'ordonnancement intégré de la production et de la distribution _____ 179

1. Introduction _____ 179

2. Approche à horizon glissant _____ 185

2.1 Nomenclature _____ 185

2.2. Approche de solution _____ 187

2.3. Modèle mathématique _____ 190

2.3.1. Fonction objectif _____ 190

2.3.2. Contraintes de suivi des lots _____ 191

2.3.3. Contraintes d'arrêts des pipelines _____ 192

2.3.4. Contraintes d'unicité des décisions _____ 193

2.3.5. Contraintes d'initialisation _____ 194

2.3.6. Durées minimales des décisions _____ 196

2.3.7. Contraintes de changement de produit _____ 196

2.3.8. Gestion des bacs multiproduits _____ 197

2.3.9. Contraintes sur la gestion des niveaux de stock _____ 200

2.4. Post-traitement _____ 203

3. Expériences numériques _____ 204

3.1. Instances _____ 205

3.2. Résultats numériques _____ 211

4. Conclusion _____ 219

Conclusion _____ 221

Bibliographie _____ 227

Introduction

L'industrie minière a longtemps été un pilier du développement industriel et de l'avancement sociétal, soutenant de nombreux secteurs tels que la construction, l'industrie manufacturière, la technologie et l'agriculture. Les minéraux et métaux extraits de la terre sont fondamentaux pour la production de matériaux d'infrastructure tels que l'acier et le béton. De plus, les technologies avancées telles que l'électronique et les énergies renouvelables dépendent fortement des métaux rares et d'autres matériaux miniers. En outre, les engrais phosphatés jouent un rôle crucial dans l'amélioration des rendements agricoles, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire mondiale.

L'industrie des phosphates est vitale pour l'agriculture et la production alimentaire, puisque le phosphore dérivé des phosphates favorise la croissance des cultures et améliore ainsi la productivité agricole. L'industrie extrait la roche phosphatée, une roche sédimentaire riche en minéraux de phosphate, qui est ensuite traitée pour produire de l'acide phosphorique ainsi que d'autres composés phosphatés utilisés dans les engrais. Compte tenu de l'augmentation de la population mondiale et de la demande alimentaire correspondante, l'importance de l'industrie des phosphates n'a jamais été aussi marquée. De plus, l'importance économique de cette industrie va au-delà de l'agriculture. Elle contribue de manière significative aux économies des pays disposant de réserves abondantes de phosphates par la création d'emplois, les revenus d'exportation et le développement industriel. Les principaux pays producteurs de phosphates, tels que le Maroc, la Chine et les États-Unis, bénéficient de l'exportation de roche phosphatée et de produits à base de phosphate.

Malgré son importance, l'industrie minière fait face à d'importants défis de durabilité. L'épuisement des réserves minérales en raison de l'augmentation de l'activité minière suscite de nombreuses inquiétudes quant à la disponibilité de ces ressources essentielles à long terme. Cet épuisement est exacerbé par des pratiques minières

inefficaces et par le manque d'initiatives de recyclage et de récupération des ressources. De plus, l'impact environnemental des activités minières, tout comme celui de la déforestation, l'érosion des sols, la contamination de l'eau et les émissions de gaz à effet de serre, pose une menace sérieuse pour les écosystèmes et la santé humaine. Aborder ces problèmes nécessite l'adoption de pratiques minières durables, telles que la réduction de la consommation d'énergie, la minimisation des déchets et la réhabilitation des sites miniers.

Cette recherche est motivée par la chaîne de valeur intégrée de production de phosphates et de distribution par pipeline de l'axe Nord du Groupe OCP, une société marocaine appartenant à l'État et un leader mondial de l'industrie des phosphates. L'entreprise joue un rôle crucial dans l'approvisionnement mondial en phosphates et en produits dérivés, avec des opérations allant de l'extraction de la roche phosphatée à la production et à la distribution mondiale d'acide phosphorique et d'engrais. L'OCP contrôle 76.8 % des réserves mondiales de roches phosphatées commerciales, toutes situées au Maroc (Cooper et al., 2011). Pour rester en ligne avec la croissance démographique et le besoin progressif en engrais, le Groupe OCP a adopté plusieurs objectifs stratégiques basés principalement sur l'augmentation des capacités de production et la réduction des coûts opérationnels. Cette transformation a généré de nouveaux intérêts multidisciplinaires en recherche, notamment en gestion industrielle.

Les travaux réalisés dans cette thèse doctorale sont menés au sein du Laboratoire de Sciences de Gestion de l'Université Paris-Panthéon-Assas (LARGEPA) et de la Chaire d'Optimisation Industrielle d'EMINES-School of Industrial Management (Université Polytechnique Mohammed VI), en collaboration avec le Groupe OCP. L'objectif de cette thèse est de concevoir des solutions opérationnelles pratiques pour l'ordonnancement de la chaîne de valeur intégrée de production et de distribution par pipeline de l'axe Nord du Groupe OCP. Cela inclut la résolution d'un problème intégré de production de phosphates dans les laveries, d'un problème d'ordonnancement du transport par réseau de pipelines multiproduits et d'un problème de gestion des stocks multiproduits. En s’appuyant sur la demande des clients locaux et internationaux sur un horizon d'ordonnancement prédéfini, la recherche vise à répondre aux questions suivantes :

- Comment obtenir une séquence optimale de lots de produits dans les laveries et les pipelines en respectant les contraintes de taille des lots et de compatibilité entre produits ?
- Comment déterminer les temps d'injection et de décharge des lots dans les pipelines ?
- Comment gérer les niveaux de stocks tout en considérant les capacités des bacs et les contraintes liées à l'affectation de produit en cas de bacs partagés ?
- Comment respecter les contraintes amont et aval tout au long du processus ?
- Comment les décisions d'ordonnancement peuvent-elles garantir la satisfaction des demandes des clients locaux et internationaux ?

Pour répondre à ces questions de recherche, une approche de recherche-ingénierique a été adoptée (Thiel, 2014). Cette démarche s'appuie sur une méthodologie systématique de conception, d'implémentation et d'évaluation de solutions opérationnelles. Elle combine les méthodes d'ingénierie industrielle et d'analyse opérationnelle pour traiter les contraintes complexes d'ordonnancement dans un environnement réel. Dans ce cadre, une collaboration étroite entre le personnel de l'axe Nord du Groupe OCP et le milieu académique permet de prendre en compte de manière précise les contraintes réelles du terrain. Le processus de recherche-ingénierique se structure autour de plusieurs phases complémentaires :

- **Phase de modélisation et conception :** Dans cette phase initiale, le problème est formellement défini à partir des contraintes industrielles, des objectifs à atteindre et des exigences opérationnelles du Groupe OCP. Des modèles mathématiques et logiques sont développés pour représenter les opérations de production, de transport par pipelines et de gestion des stocks, et divers types de solutions potentielles sont explorés.
- **Phase de conception et prototypage :** Sur la base des modèles établis, des prototypes sont développés et intégrés dans des environnements de test. Cette étape permet de tester différentes approches de solution afin d'identifier celles offrant le meilleur compromis entre performance et faisabilité opérationnelle. Les prototypes sont développés en étroite collaboration avec les équipes de planification du Groupe OCP, assurant une représentation réelle du terrain.

- **Phase d'implémentation et expérimentation :** Une fois les solutions validées en environnement simulé, elles sont déployées sous forme de démonstrateurs ou de modules opérationnels. Des jeux de données réels issus de la chaîne de valeur de l'OCP sont utilisés pour expérimenter les outils développés dans des conditions quasi réelles. Cette phase inclut également des tests en conditions opérationnelles sur des périodes définies afin de mesurer la performance des solutions.
- **Phase d'évaluation et d'optimisation continue :** Les résultats obtenus lors des expérimentations sont systématiquement analysés à l'aide d'indicateurs de performance spécifiques. Les retours d'expérience des opérateurs et des responsables de la chaîne de valeur alimentent un processus itératif d'amélioration continue. Ce cycle d'évaluation permet de raffiner les modèles, d'ajuster les paramètres et d'améliorer les stratégies d'ordonnancement pour garantir un meilleur pilotage de la chaîne de valeur du Groupe OCP.
- **Phase de transfert et capitalisation :** Une fois les solutions validées, les résultats et les méthodologies sont documentés et partagés avec l'ensemble des parties prenantes, assurant un transfert de connaissances.

Cette démarche de recherche-ingénierique garantit que les solutions développées sont non seulement théoriquement robustes, mais également directement applicables et adaptées aux contraintes opérationnelles spécifiques du Groupe OCP. L'intégration continue des retours du terrain assure une amélioration permanente des solutions.

Le premier chapitre de cette thèse offre un aperçu de la gestion de la chaîne de valeur, du contexte industriel entourant la recherche et des approches de solution employées dans les chapitres suivants. Il débute par une introduction aux concepts clés et à l'évolution de la gestion de la chaîne de valeur au fil du temps, en examinant les différents flux au sein des chaînes de valeurs, les niveaux de prise de décision impliqués et les différentes stratégies de production adoptées. Ensuite, le chapitre présente la chaîne de valeur globale du Groupe OCP et les paramètres pertinents pour la recherche. Le chapitre expose ensuite le problème de recherche et explore diverses approches de solutions qui seront utilisées dans les chapitres suivants de la thèse.

Le chapitre 2 présente une analyse bibliométrique et une revue systématique de la littérature sur l'ordonnancement des pipelines multiproduits, en se concentrant sur les travaux publiés de l'an 2000 à 2023. En utilisant trois bases de données scientifiques réputées, le travail de recherche rassemble et examine méthodiquement les métadonnées pour mener une analyse bibliométrique afin de comprendre l'évolution de la recherche, les thèmes clés, les principaux auteurs et les revues pertinents, ainsi que la répartition géographique des affiliations des auteurs. Les articles sélectionnés pour l'analyse bibliométrique ont ensuite été affinés pour livrer une revue systématique de la littérature. Un cadre de recherche a été développé pour classer la littérature en thèmes communs afin de faciliter la navigation entre les articles. Les critères de classification incluent les domaines d'étude, les topologies des systèmes de pipelines, le degré de précision de l'ordonnancement, l'environnement de l'ordonnancement, les contraintes opérationnelles, les représentations temporelles et volumétriques, les stratégies de solution et enfin, les objectifs. Les résultats obtenus fournissent une vision claire et approfondie de l'état actuel du domaine et mettent en évidence des directions prometteuses pour les recherches futures.

Le chapitre 3 aborde le problème détaillé de l'ordonnancement des opérations de production et de distribution au sein de l'axe Nord du Groupe OCP. Un modèle monolithique de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) centré sur les lots et en temps continu a été proposé pour résoudre le problème industriel, comprenant un problème d'ordonnancement de production multiproduits, un problème d'ordonnancement de transport par réseau de pipelines multiproduits et un problème de gestion des stocks sensibles multiproduits. L'objectif est de créer un plan d'ordonnancement pour toutes les opérations détaillées de la chaîne de valeur, tout en maximisant l'utilisation des pipelines pour le transport des produits et en respectant les contraintes de production, de transport et de stockage, ainsi que les exigences de la demande des clients. Le modèle MILP proposé a été évalué en utilisant des instances de jeux de données réels provenant de la chaîne de valeur de l'OCP ; les résultats expérimentaux démontrent son efficacité à fournir des solutions optimales et quasi-optimales dans un temps de calcul raisonnable.

Le chapitre 4 présente une approche heuristique basée sur la simulation en temps discret pour le problème intégré d'ordonnancement de la production et de la distribution par pipeline. L'approche proposée a été évaluée à l'aide d'une étude de cas réel dans différents scénarios sur un horizon de deux semaines. Les résultats expérimentaux démontrent que l'approche proposée peut fournir des solutions d'ordonnancement satisfaisantes dans un temps de calcul raisonnable. De plus, l'heuristique proposée procure des résultats satisfaisants après huit mois de fonctionnement dans des conditions réelles.

Le chapitre 5 aborde l'ordonnancement détaillé dynamique au sein de la chaîne de valeur intégrée de l'axe Nord du Groupe OCP. Il introduit une approche originale MILP, basée sur un horizon glissant pour l'ordonnancement dynamique des opérations de la chaîne de valeur. Les principaux objectifs de cette approche sont de réduire les ruptures totales de produits et de minimiser la quantité d'eau injectée dans les pipelines. De plus, une approche MILP a été développée, avec pour objectif de minimiser les changements d'état dans plusieurs unités, affinant ainsi les solutions d'ordonnancement et les rendant directement applicables aux opérations réelles. L'approche proposée a été testée en utilisant des instances de jeux de données réels provenant de la chaîne de valeur de l'OCP ; les résultats expérimentaux démontrent son efficacité à fournir des solutions de haute qualité dans un temps de calcul raisonnable.

Enfin, une conclusion générale est proposée, mettant en lumière les contributions managériales et académiques de la recherche présentée dans les travaux de thèse. Cette section synthétise les résultats et offre des perspectives pour les travaux futurs qui peuvent découler de cette thèse.

Les travaux de recherche réalisés ont donné lieu à cinq soumissions à des revues internationales et à trois communications lors de conférences internationales. La liste des articles scientifiques produits pendant cette thèse est présentée ci-dessous :

Journaux internationaux à comité de lecture :

- Mouad SIDKI, Tchernev NIKOLAY, Pierre FÉNIÈS, Libo REN, Selwa EL FIRDOUSSI, (2025). Multiproduct Pipeline Scheduling: A comprehensive Bibliometric Analysis and a Systematic Literature Review. Computers & Chemical Engineering, 108911.
  https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108911
  Cet article présente les travaux du Chapitre 2.
- Mouad SIDKI, Tchernev NIKOLAY, Pierre FÉNIÈS, Libo REN, Selwa EL FIRDOUSSI, (2025). A monolithic batch-centric MILP approach for a real-world integrated production and pipeline distribution scheduling problem. Computers & Industrial Engineering, 203, 111028.
  https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111028
  Cet article présente les travaux du Chapitre 3.
- Mouad SIDKI, Sidki, M., Tchernev, N., Féniès, P., Ren, L., & Elfirdoussi, S. (2025). Heuristic based decision approach for an integrated slurry pipeline network scheduling in the phosphate industry. Expert Systems with Applications, 126495.
  https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.126495
  Cet article présente les travaux du Chapitre 4.
- Mouad SIDKI, Tchernev NIKOLAY, Pierre FÉNIÈS, Libo REN, Selwa EL FIRDOUSSI, (2025). A novel rolling horizon product-centric MILP based approach for a real-world integrated production and distribution scheduling problem. Under review by OMEGA - The International Journal of Management Science.
  Cet article présente les travaux du Chapitre 5.
  http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4895719
- Meryem BAMOUMEN, Selwa EL FIRDOUSSI, Libo REN, Mouad SIDKI, Nikolay TCHERNEV, (2025). A novel MILP model for the multi-product pipeline network scheduling problem. Under review by Industrial & Engineering Chemistry Research.

Conférences internationales :

- Mouad SIDKI, Tchernev NIKOLAY, Selwa EL FIRDOUSSI, (2021). A multi-product scheduling heuristic for a multiple-source slurry pipeline in the phosphate industry. CIGI QUALITA 2021.
- Mouad SIDKI, Tchernev NIKOLAY, Selwa EL FIRDOUSSI. (2022). A MILP approach for detailed pipeline scheduling and storage management problem in the phosphate industry. IFAC-PapersOnLine, 55(10), 2563–2568. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.095
- Mouad SIDKI, Tchernev NIKOLAY, Pierre FÉNIÈS, Libo REN, Selwa EL FIRDOUSSI, (2023). A MILP approach for detailed operational scheduling of a supply chain in the phosphate industry. CIGI QUALITA MOSIM 2023. https://doi.org/10.60662/MRSX-C330

Chapitre 1 : Préliminaires

1. INTRODUCTION

Ce chapitre explore la gestion de la Supply Chain (SC), en se concentrant sur le cas du Groupe OCP, afin d'établir les fondations pour aborder les problèmes d'ordonnancement de la production de phosphates et de distribution par pipeline multiproduit, qui représentent l'objectif principal de cette thèse. Nous commençons par un aperçu des concepts clés et de l'évolution de la gestion de la Supply Chain au fil du temps, des différents flux au sein des SCs, des niveaux de prise de décision impliqués et des différentes stratégies de production adoptées. Ensuite, nous présentons la SC globale du Groupe OCP et les paramètres entourant les travaux de recherche menés dans cette thèse. Enfin, le problème de recherche est formulé, suivi d'une exploration des diverses approches de solution utilisées dans les chapitres suivants.

2. GESTION DE LA SUPPLY CHAIN

2.1. Définitions et évolution

Une Supply Chain peut être définie comme étant un réseau d'organisations ou d'individus directement impliqués dans divers processus et activités en amont et en aval, qui produisent de la valeur sous forme de produits, de services, de finances et/ou d'informations, et ce, de la source au client (Mentzer et al., 2001). La gestion de la Supply Chain (SCM) est la coordination stratégique des fonctions commerciales intra et inter-entreprises de la Supply Chain, dans le but d'améliorer les performances à long terme et d'obtenir ainsi un avantage concurrentiel (Mentzer et al., 2001). Cette discipline de gestion se concentre sur l'amélioration des opérations grâce à une

meilleure coordination et collaboration entre tous les partenaires impliqués dans la Supply Chain, visant à synchroniser l'offre et la demande, à améliorer la flexibilité et à réduire les coûts. L'objectif ultime de la stratégie de gestion de la Supply Chain est d'améliorer l'avantage concurrentiel et la satisfaction des clients en gérant de bout en bout les processus qui créent des biens et des services.

Les origines de la gestion moderne de la Supply Chain remontent aux années 1940, lorsque l'accent était principalement mis sur l'amélioration de l'efficacité logistique, essentiellement dans le transport et l'entreposage. Durant cette période, les industries maritimes ont commencé à utiliser des conteneurs intermodaux dans les secteurs de transport maritime, ferroviaire et routier, conduisant à la mondialisation des Supply Chains. Les années 1990 ont été les témoins d'une révolution technologique dans ce domaine. Des technologies telles que les systèmes de planification des ressources d'entreprise (ERP) sont devenues cruciales pour la gestion des Supply Chains complexes (Moon, 2007). Ces systèmes ont permis le partage de données en temps réel, améliorant ainsi la réactivité et l'efficacité des opérations internes, en optimisant la gestion des ressources, la coordination entre les départements et la prise de décisions, tout en réduisant les erreurs et les redondances. Au fil du temps, les chaînes de valeur sont devenues plus complexes et globalement dispersées. L'accent s'est déplacé vers la gestion globale et les partenariats stratégiques, et les Supply Chains réussies se caractérisaient par une collaboration robuste entre les fournisseurs, les fabricants et les clients (Mentzer et al., 2001). Plus tard, le concept de Supply Chain Management 2.0 a émergé, intégrant Internet et la technologie mobile dans les opérations, facilitant une collaboration et une visibilité plus profondes (Christopher & Holweg, 2011). Ces dernières années, la durabilité et la résilience sont devenues des thèmes centraux de la SCM (Seuring & Müller, 2008), soulignant l'importance de concevoir et de gérer des Supply Chains résilientes, qui doivent être non seulement plus efficaces, mais aussi plus respectueuses de l'environnement et socialement responsables, afin de répondre aux enjeux actuels de durabilité, ainsi qu'aux attentes croissantes des consommateurs et des parties prenantes. Les impacts économiques et sociaux de la pandémie de COVID-19 ont de nouveau souligné l'importance de

posséder des chaînes résilientes, capables de s'adapter et de se rétablir rapidement en cas de perturbations (Raj et al., 2022).

2.2. Flux dans les Supply Chains

Les Supply Chains peuvent être catégorisées en fonction de la nature des flux qui traversent leurs nœuds, en partant des sources jusqu'aux clients finaux. Ces flux peuvent être principalement classés en trois types : flux physiques, flux d'informations et flux financiers.

Les flux physiques peuvent être définis comme étant un ensemble d'unités qui se déplacent dans l'espace, que ce soit sur une surface, le long d'un plan, d'une courbe ou d'une ligne droite, suivant une loi spécifique (Tchernev, 1997). Ces unités incluent tous les biens tangibles tels que les matières premières, les produits en cours de fabrication et les produits finis. Féniès (2006) souligne que la durée de ces processus de flux aide à planifier la productivité d'un système, tandis que la relation quantité/temps décrit la productivité du système. Les flux physiques ont un impact direct sur la capacité d'une entreprise à répondre efficacement à la demande des clients. La vitesse, la fiabilité et l'efficacité des coûts des flux physiques déterminent la productivité et la compétitivité de la Supply Chain. La gestion des flux de produits implique souvent la logistique, le contrôle des stocks et la gestion des transports.

Le flux physique des biens et des matériaux dans une Supply Chain peut être catégorisé en trois principaux sous-types : discret, continu et hybride. Ces différents types influencent les décisions du niveau stratégique au niveau opérationnel. Les flux physiques discrets impliquent le mouvement d'objets distincts et comptables. Ce type est courant dans des industries telles que l'électronique, l'automobile et la machinerie, où des objets individuels ou des lots sont manipulés de manière discrète (Hopp & Spearman, 2011). Ici, le défi réside dans la gestion des exigences uniques de chaque produit, tout en maintenant l'efficacité opérationnelle. En revanche, les flux physiques continus impliquent le mouvement ininterrompu de matériaux, souvent sous forme de vrac, comme dans les industries chimiques, de transformation des aliments et également minières, où des produits tels que des liquides, des semi-liquides ou des

granulés sont produits, stockés et transportés de manière continue. Maintenir un taux de production constant, assurer l'alignement de l'offre et de la demande et respecter les normes de contrôle de la qualité sont des défis auxquels sont confrontées les industries adoptant un flux physique continu. En outre, les flux physiques hybrides intègrent des éléments à la fois des flux discrets et continus, courants dans les industries où des parties de produits sont produites de manière continue et assemblées de manière discrète. La production des appareils électroniques en est un exemple, puisque leurs composants, tels que les microprocesseurs, peuvent être produits de manière continue, mais leur assemblage se fait par étapes discrètes.

Le flux d'information fait référence à la transmission des informations entre différents acteurs du système d'information. Ce flux permet de prendre des décisions éclairées, basées sur des données en temps réel, y compris les niveaux de stocks, les plannings des opérations et les prévisions de la demande, qui sont essentiels à la coordination des activités à travers la Supply Chain, afin d'améliorer la réactivité et l'efficacité (Chopra & Meindl, 2007). Les solutions technologiques telles que les systèmes de planification des ressources d'entreprise (ERP) et les systèmes de planification et d'ordonnancement (PSS) sont cruciales pour améliorer la gestion des flux d'information.

Enfin, le flux financier implique les processus de transaction liés au paiement, au crédit, à la facturation et aux flux de trésorerie entre les entités liées à une Supply Chain. Un flux financier efficace assure la santé financière de la Supply Chain, facilitant des opérations plus fluides et favorisant la confiance entre les entités (Hugos, 2024).

Les flux physiques, financiers et informationnels sont interdépendants, ce qui signifie qu'une perturbation de l'un peut affecter les autres. Par exemple, un retard dans l'acquisition de matières premières en raison d'un problème logistique peut ralentir la production (affectant le flux de matériaux), ce qui peut à son tour retarder les expéditions aux clients et perturber le flux financier en raison des paiements retardés. De même, un mauvais flux d'informations peut entraîner des plannings de production

mal alignés, des excédents de stock ou des ruptures, impactant les flux de matériaux et financiers.

2.3. Niveaux de prise de décision

La prise de décision en gestion de la Supply Chain est un processus complexe qui implique des décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles. Chaque type de décision sert des objectifs différents et opère sur des horizons temporels variés.

Les décisions stratégiques concernent des objectifs à long terme de haut niveau, impliquant des investissements et des engagements significatifs qui déterminent l'orientation générale de la Supply Chain. Les décisions stratégiques peuvent inclure le choix des partenaires, la décision sur les emplacements géographiques des installations, la détermination de la structure de la Supply Chain et enfin, les décisions concernant l'intégration verticale ou l'externalisation. Ces décisions nécessitent une analyse approfondie des tendances du marché, des conditions économiques et des objectifs de l'entreprise. La prise de décision stratégique dans les Supply Chains implique d'évaluer les compromis entre efficacité et réactivité, d'adapter la Supply Chain aux conditions changeantes du marché et de la positionner pour un avantage concurrentiel durable (Hugos, 2024).

La prise de décision tactique en gestion de la Supply Chain se concentre sur des horizons de planification à moyen terme, visant à améliorer l'utilisation des actifs physiques au sein du réseau de la Supply Chain et à organiser efficacement le flux de marchandises. Ces décisions se situent entre la planification stratégique et l'ordonnancement opérationnel, traduisant les stratégies de haut niveau en plans d'action, destinés à améliorer l'efficacité et la réactivité dans toute la Supply Chain. Elles impliquent des décisions telles que l'allocation des produits aux installations de production appropriées, l'adaptation des commandes clients aux installations de stockage spécifiques, la définition des objectifs de production et de stockage, et la gestion des équilibres entre l'offre et la demande. Par conséquent, la prise de décision tactique nécessite un équilibre minutieux entre les objectifs stratégiques et les contraintes opérationnelles et elle est cruciale pour maintenir la flexibilité et la

réactivité de la Supply Chain face aux demandes changeantes du marché et aux défis opérationnels (Schmidt & Wilhelm, 2000).

Les décisions opérationnelles se jouent dans un délai bref et se concentrent sur l'exécution des plans tactiques. Ces décisions ont généralement un impact à court terme, allant de quelques jours à quelques semaines, et impliquent des décisions qui garantissent que le flux de produits se déplace efficacement des fournisseurs aux clients. Cela inclut des décisions sur l'exécution des commandes, la planification et l'ordonnancement de la production, la gestion des transports, les opérations d'entrepôt et la gestion des demandes des clients. L'alignement efficace de ces opérations avec les stratégies de haut niveau est essentiel, nécessitant des systèmes d'information avancés ainsi qu'une gestion robuste des risques pour gérer les défis inhérents à l'équilibre de l'offre et de la demande. Selon Schmidt & Wilhelm (2000), les décisions opérationnelles déterminent quand et où les tâches de fabrication doivent être effectuées pour garantir les délais de livraison aussi rapides et précis que possible. Étant donné les configurations stratégiques des ressources et les politiques de planification à moyen terme, les décisions opérationnelles visent à assurer l'utilisation efficace des installations et à maximiser les profits à court terme.

2.4. Stratégies de production

Dans une Supply Chain, il est possible de différencier deux stratégies de production : Fabrication sur Stock (MTS : *Make to Stock*) et Fabrication à la Commande (MTO : *Make to Order*), ainsi que leur approche combinée. Ces stratégies jouent un rôle crucial dans la définition des modalités de production et de livraison des produits pour répondre aux demandes des clients.

Le MTS est une stratégie de production selon laquelle les biens sont fabriqués à l'avance en fonction de la demande anticipée des clients. Cette méthode est courante dans les industries caractérisées par des délais de livraison longs et des prévisions de demande stables. Elle permet des économies d'échelle, conduisant à des gains d'efficacité dans les coûts de production. De plus, elle garantit la disponibilité immédiate des produits, ce qui est crucial sur les marchés où les clients attendent des

délais de livraison rapides. Néanmoins, une limitation significative de la stratégie MTS est le risque de surproduction et d'excès de stocks, ce qui peut entraîner des coûts substantiels si les prévisions de demande ne sont pas précises (Spearman & Zazanis, 1992).

À l'inverse, la stratégie MTO est adoptée lorsque les demandes des clients sont moins prévisibles ou lorsque la personnalisation est requise, impliquant que les biens soient fabriqués uniquement après la réception d'une commande. Comparée au MTS, la stratégie MTO présente un risque moindre d'excès de stocks, puisque les produits sont fabriqués sur commande. De plus, elle permet une plus grande personnalisation, répondant aux besoins spécifiques des clients et pouvant potentiellement générer des profits plus élevés. Par exemple, dans l'industrie automobile, le nombre de produits finaux possibles peut être remarquablement élevé en raison des nombreuses options disponibles pour chaque composant et caractéristique, tenant compte de facteurs tels que la couleur, le type de moteur, les matériaux intérieurs, les packs technologiques et les accessoires supplémentaires. Chaque catégorie peut offrir une gamme importante de choix et, lorsqu'elles sont multipliées ensemble, les configurations potentielles peuvent se chiffrer en millions. Cependant, le principal défi du MTO est la durée relativement plus longue des délais de livraison, car la production commence après la passation de la commande, ce qui pourrait ne pas être acceptable sur les marchés où une livraison rapide est cruciale (Spearman & Zazanis, 1992).

Le choix entre MTS et MTO dépend en grande partie du modèle économique de l'entreprise, des demandes du marché, des caractéristiques des produits et de l'importance stratégique de la personnalisation par rapport à l'efficacité. Cependant, une stratégie combinée, souvent appelée Fabrication sur prévisions (MTF : *Make to Forecast*), fusionne les principes du MTS et du MTO, tentant d'équilibrer leurs avantages et inconvénients. Dans cette approche hybride, les produits sont en partie fabriqués en stock en fonction de la demande prédite, et l'assemblage final ou la personnalisation est complété une fois les commandes réelles reçues. Cette approche peut réduire les délais de livraison et les coûts de stockage tout en permettant un certain degré de personnalisation. Olhager (2010) définit un point de découplage de commande client (CODP) comme l'emplacement au sein d'une Supply Chain où les processus

pilotés par les commandes clients commencent, les distinguant des opérations pilotées par les prévisions. Il marque le point où les stocks sont associés à des commandes spécifiques, passant d'une production générique à une production personnalisée. L'utilisation stratégique du CODP peut aider les entreprises à intégrer efficacement les stratégies MTS et MTO, améliorant à la fois l'efficacité et le service client. Cette approche est particulièrement pertinente pour les entreprises qui offrent un large catalogue de produits et qui doivent équilibrer entre une production standardisée et des produits personnalisés.

3. INTRODUCTION AU PROBLEME

Cette section présente le problème de recherche exploré dans cette thèse et donne un aperçu du contexte industriel qui l'entoure.

3.1. Contexte industriel

Le Groupe OCP, initialement créé sous le nom d'Office Chérifien des Phosphates en 1920, est une société marocaine appartenant à l'État et un leader mondial de l'industrie des phosphates. L'entreprise joue un rôle crucial dans l'approvisionnement mondial en phosphates et en produits dérivés, avec des opérations allant de l'extraction de la roche phosphatée à la production et à la distribution mondiale d'acide phosphorique et d'engrais. L'OCP contrôle 70 % des réserves mondiales de phosphates, toutes situées au Maroc.

Les activités principales du Groupe OCP englobent l'extraction de la roche phosphatée, la fabrication d'acide phosphorique et d'engrais à base de phosphates, ainsi que la commercialisation de ces produits à l'échelle mondiale. L'infrastructure de l'entreprise soutient une large gamme de processus industriels et logistiques, incluant l'extraction de la roche phosphatée, son traitement et son lavage, puis son transport via un vaste système de convoyeurs à bande longue distance, de trains et de pipelines vers des complexes industriels et des ports. Les produits finis sont livrés à de nombreux clients dans plus de 80 pays, grâce à une infrastructure maritime spécialisée,

garantissant une livraison efficace et fiable. Ce réseau, associé à des stratégies de marketing adaptées, permet à l'OCP de répondre aux divers besoins des clients internationaux en offrant des solutions d'engrais personnalisées qui améliorent la productivité agricole.

Le Groupe OCP a stratégiquement décentralisé sa Supply Chain en trois axes distincts : Nord, Centre et Sud, chacun adapté aux ressources et défis géographiques régionaux. Comme illustré dans la Figure 1.1, la Supply Chain de l'axe Nord comprend les sites miniers de Khouribga, deux modes de transport (par un réseau de slurry pipelines de 235 km et par voie ferroviaire), plusieurs laveries, et le complexe industriel de Jorf Lasfar ainsi que les ports de Casablanca et Jorf Lasfar. Le site minier de Khouribga détient la plus grande réserve de phosphate au Maroc, soit environ 43 % des réserves nationales. Après l'extraction et le traitement du minerai par les laveries, il est transporté soit par le réseau de slurry pipelines jusqu'au complexe industriel de Jorf Lasfar, où l'acide phosphorique et les engrais sont fabriqués et exportés, soit par train pour être exporté depuis le port de Casablanca.

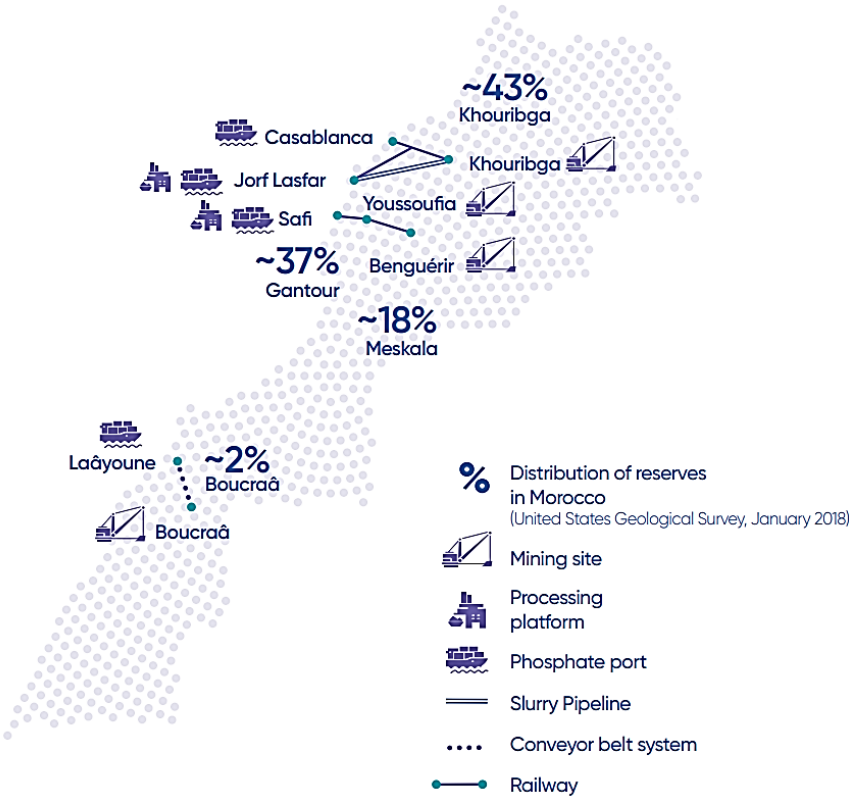


Figure 1.1. Aperçu de la Supply Chain du Groupe OCP (OCP Sustainably report 2020)

La Supply Chain de l'axe Centre comprend les sites miniers de Benguerir et Youssoufia, une voie ferrée, une plateforme chimique et le port de Safi. La mine de Benguerir est considérée comme étant l'une des mines à ciel ouvert les plus importantes de l'entreprise en termes de recherche sur les opérations minières. De plus, les sites miniers de Benguerir et Youssoufia constituent le site de Gantour, considéré comme étant la troisième plus grande mine de phosphate au monde. Les minerais de phosphate extraits des sites miniers de l'axe Centre sont transportés par train jusqu'à la plateforme chimique de Safi, où ils sont transformés en acides et engrais avant d'être exportés via le port de Safi.

La Supply Chain de l'axe Sud comprend le site minier de Boucrâa, le plus long convoyeur à bande du monde et le port de Laâyoune. La roche phosphatée extraite de la mine de Boucrâa est transportée via un convoyeur à bande de 102 km jusqu'au site de traitement de Laâyoune avant d'être exportée depuis le port de Laâyoune.

Grâce à cette approche décentralisée, l'OCP veille à ce que chaque segment de sa Supply Chain soit adapté aux besoins régionaux spécifiques, améliorant ainsi la productivité globale et la durabilité. Cette segmentation stratégique donne lieu à des investissements ciblés dans l'infrastructure et la technologie, une formation adaptée de la main-d'œuvre et des réponses plus agiles aux demandes du marché.

La Supply Chain de l'axe Nord du Groupe OCP est illustrée dans la Figure 1.2. Le flux de phosphate commence sous forme de minerai dynamité dans trois mines à ciel ouvert situées dans la région de Khouribga. Le minerai de phosphate extrait est concassé pour réduire sa granularité, criblé pour séparer les fines particules des morceaux plus gros, puis broyé pour réduire davantage la taille des particules. Le minerai de phosphate traité devient un produit primaire, prêt à être lavé dans des laveries.

Dans les laveries, le minerai de phosphate subit une série de traitements pour éliminer les impuretés et concentrer les minéraux de phosphate. Ce processus commence par le mélange du minerai de phosphate primaire avec de l'eau, créant une pulpe. Cette pulpe est ensuite traitée par une série d'étapes de lavage et de criblage conçues pour séparer le phosphate des matériaux accompagnateurs, tels que les argiles,

le calcaire et autres minéraux. La première phase implique généralement un processus de déschlammage, où la pulpe est passée à travers des classificateurs pour éliminer les fines particules d'argile et de calcaire, qui sont suspendues dans l'eau et peuvent être facilement séparées. Après le déschlammage, la pulpe peut subir des processus de flottation, où des produits chimiques sont ajoutés pour se lier sélectivement aux particules de phosphate, les rendant hydrophobes et leur permettant de s'attacher aux bulles d'air. Ces bulles flottent à la surface, emportant le phosphate avec elles, où il forme une mousse qui peut être séparée. Cela concentre le phosphate tout en laissant la majorité du matériau indésirable au fond. Enfin, le phosphate concentré est rincé pour éliminer les impuretés restantes et les produits chimiques de flottation, garantissant la haute pureté du produit final. À ce stade, le phosphate devient un produit intermédiaire qui peut être envoyé pour un traitement chimique supplémentaire, préparé pour le transport par pipeline, ou séché et stocké.

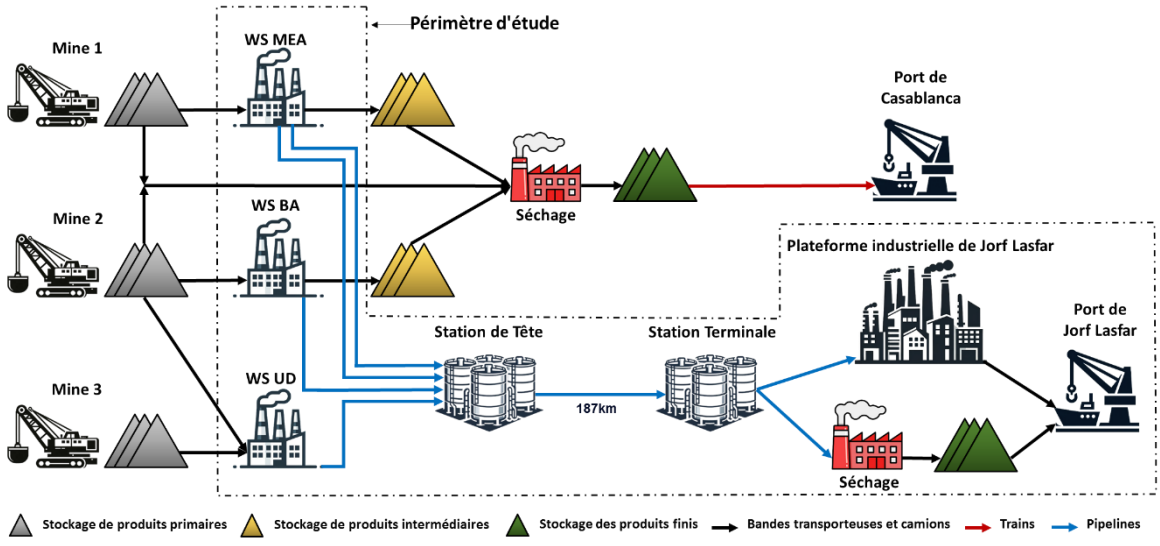


Figure 1.2. Flux physique de la Supply Chain de l'axe Nord du Groupe OCP

En fonction des caractéristiques et des proportions des composants de la pulpe, celle-ci peut être directement considérée comme un produit fini, mélangée directement, ou séchée et mélangée pour devenir un produit fini. Ces produits finis sont classés en différentes qualités incluant un produit local utilisé par tous les clients de la plateforme industrielle de Jorf Lasfar pour produire de l'acide phosphorique et des engrais, et sept produits supplémentaires qui sont exportés par les ports de Casablanca et Jorf Lasfar.

En plus des convoyeurs à bande et des camions utilisés pour le transport du phosphate entre les mines, les laveries et une installation de séchage, deux moyens de transport sont considérés pour le transport longue distance : les trains et les pipelines. Pour le transport par train, le phosphate intermédiaire entrant des laveries est d'abord séché, stocké, puis mélangé pour devenir un produit final. En fonction de la pureté du phosphate extrait des mines 1 et 2, il peut être directement transporté et utilisé comme composant dans un mélange de produit final. Une fois qu'une quantité suffisante d'un produit final est disponible, il peut être transporté par train jusqu'au port de Casablanca pour l'exportation. Pour le transport par pipeline, le phosphate subit des processus supplémentaires pour adapter sa granularité et sa densité dans les laveries pour la distribution longue distance par pipeline. En fonction de la composition de la pulpe traitée à la sortie des laveries, elle peut être directement considérée comme un produit fini ou être mélangée pour en devenir un à la station de tête. Un pipeline principal de 187 km relie les bacs de la station de tête à Khouribga aux bacs de la station terminale à Jorf Lasfar. Le produit local est continuellement consommé par plusieurs clients sur la plateforme industrielle de Jorf Lasfar, et les produits d'export subissent un processus de filtration pour réduire la quantité totale d'eau contenue, puis sont séchés et stockés avant l'arrivée des navires.

Le périmètre du problème d'ordonnancement étudié dans cette thèse est délimité par la ligne pointillée dans la Figure 1.2. Nous nous intéressons à un problème d'ordonnancement de la production dans les laveries, un problème d'ordonnancement de la distribution par réseau de pipelines et un problème de gestion des stocks multiproduits. L'objectif est de fournir des solutions d'ordonnancement de haute qualité, directement applicables par l'équipe d'ordonnancement de l'entreprise, tout en respectant toutes les contraintes opérationnelles et en garantissant la livraison continue du produit local et la disponibilité des produits d'export avant les dates d'échéance de la demande.

3.2. Problème de recherche

La Figure 1.3 illustre la chaîne intégrée de production et de distribution par pipeline de l'axe Nord du Groupe OCP, qui comprend plusieurs laveries et des pipelines secondaires qui connectent ces laveries à la station de tête. De là, un pipeline principal s'étend jusqu'à la station terminale. À la station terminale, plusieurs pipelines de courte distance assurent la distribution du phosphate aux clients locaux et internationaux, ainsi qu'à des processus industriels supplémentaires. Les laveries peuvent produire un produit fini à partir d'un ensemble de produits prédéfinis pendant une période donnée, tout en maintenant un débit constant. De plus, les lots produits doivent respecter une quantité minimale de production et une durée minimale de configuration doit être appliquée en cas de changement de production. En outre, les fenêtres de temps prédéfinies pour la maintenance doivent être prises en compte. En outre, si une différence de débit existe entre les laveries et leur pipeline secondaire connecté, un bac de stockage intermédiaire est considéré pour absorber les différences de débit, comme c'est le cas pour la laverie WS UD et les débits combinés de WS BA LG et WS BA HG. Ces différences de débit sont dues à la topologie du terrain traversé par les pipelines, à la distance entre les laveries et la station de tête et à la distribution des unités de pompage le long du pipeline secondaire. À l'inverse, lorsque les distances sont courtes et que le terrain est relativement plat, comme c'est le cas avec WS MEA LG et WS MEA HG, le débit des pipelines secondaires peut être adapté pour égaler le débit des laveries, rendant ainsi les bacs de stockage intermédiaires inutiles.

Les produits stockés dans les bacs des laveries et de la station de tête sont injectés dans les pipelines secondaires et le pipeline principal sous forme de lots, en respectant une contrainte de taille minimale. Pour éviter la contamination entre différents produits, une quantité minimale d'eau est nécessaire pour séparer les lots. Cette quantité d'eau est également utilisée pour détecter les extrémités des lots à la fin des pipelines en surveillant les changements de densité au fil du temps. De plus, la même séquence et les mêmes volumes de lots injectés dans les pipelines sont déchargés à la station de tête pour les pipelines secondaires et à la station terminale pour le pipeline principal. En outre, les arrêts des pipelines dus à des maintenances prédéfinies ou survenant

pendant l'horizon d'ordonnancement doivent être pris en compte, étant donné que les temps de transport des lots en dépendent, ce qui complique encore le problème d'ordonnancement.

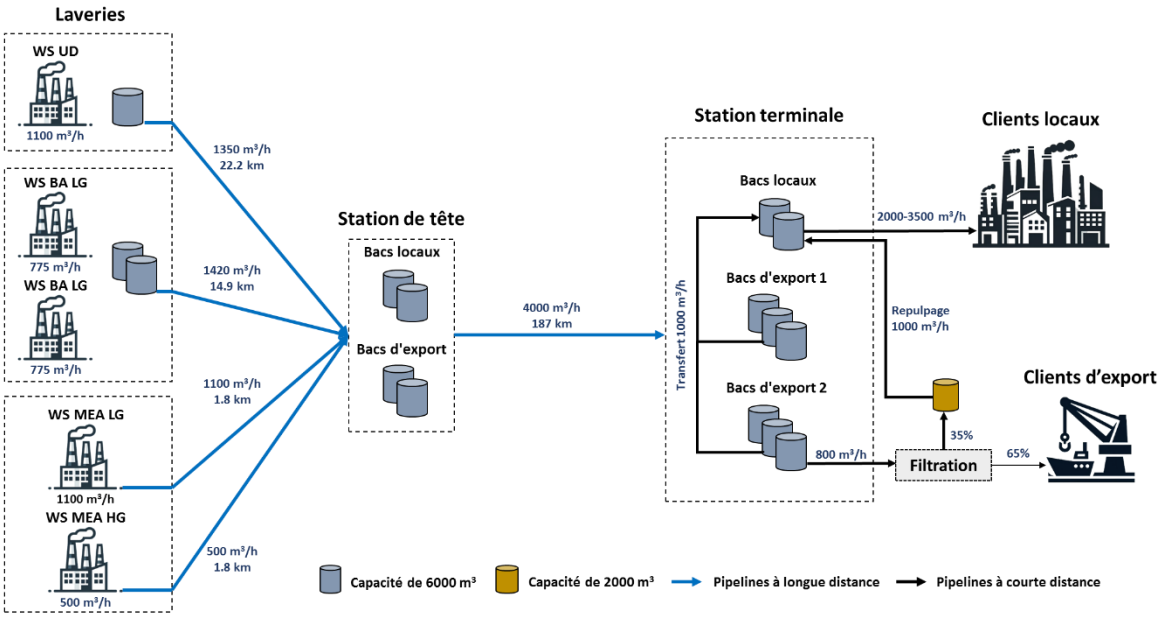


Figure 1.3. Chaîne de production et de distribution intégrée étudiée

En plus des contraintes de production et de distribution par pipeline précédemment présentées, une gestion détaillée des stocks multiproduits est nécessaire pour la conformité des solutions d'ordonnancement avec les opérations réelles. Les bacs connectés entre eux sont regroupés dans un, deux ou trois groupes de bacs qui peuvent être entièrement dédiés au stockage d'un produit, ou bien ils peuvent permettre le stockage de différents produits à différentes périodes, ce qui rend ce problème d'ordonnancement unique par rapport à la littérature étudiée dans laquelle un bac a un produit dédié en permanence. En raison des restrictions industrielles, le niveau de stock dans un bac doit toujours être compris entre un minimum de 10% et un maximum de 90% de capacité, ce qui diminue la capacité réelle de stockage des bacs à 80 %. De plus, la gestion des groupes des bacs partagés entre plusieurs produits est complexifiée par des considérations supplémentaires liées à la gestion de la contamination. Par exemple, comme un produit peut être stocké dans un groupe de bacs à une période donnée, et comme il y a toujours au moins une quantité de pulpe de 10 % stockée dans ce groupe en permanence, les nouveaux produits de meilleure qualité à stocker dans ce

bac risquent la contamination lorsqu'ils sont mélangés avec des produits de qualité relativement inférieure précédemment stockés. Pour cette raison, une opération de rinçage est obligatoire pour préparer le bac pour le stockage du nouveau produit. Un lot de rinçage du produit de haute qualité est produit dans une laverie, puis mélangé avec la pulpe restante dans tous les bacs qui le contiendront, en commençant par les laveries et en arrivant à la station terminale. Ce processus améliore la qualité du mélange, et une fois que les bacs sont de nouveau vidés à 10 %, ils peuvent stocker le nouveau produit.

Le produit local utilisé par les unités de traitement chimique à la station terminale représente actuellement en moyenne environ 90 % de la demande totale. Par conséquent, des groupes de bacs dédiés sont alloués pour ce produit à la fois à la station de tête (bacs locaux) et à la station terminale (bacs locaux et bacs d'export 1). À la station terminale, les bacs d'export 1 sont connectés aux bacs locaux via l'utilisation d'un pipeline de transfert. Pour le reste des groupes de bacs, ils sont partagés entre les produits d'export à la station de tête et à la station terminale et entre tous les produits aux laveries. De plus, comme la demande pour les produits d'export est discrète, leur stratégie de production est de type make-to-stock. Les produits arrivant à la station terminale sont stockés dans les bacs d'export 2, filtrés pour réduire la quantité d'eau qu'ils contiennent, puis passent par d'autres processus de séchage avant d'être exportés. Le périmètre de ce travail de recherche s'arrête à l'opération de filtration, qui aboutit à deux sorties, une pulpe concentrée représentant 65 % du débit d'entrée et une pulpe diluée qui peut être stockée dans un bac dédié puis transférée aux bacs locaux via le pipeline de repulpage ou bien elle peut être éliminée.

Auparavant, l'ordonnancement des opérations de production et de distribution par pipeline était réalisé manuellement, principalement à l'aide d'Excel ou du logiciel de planification "Quintiq" créé par une entreprise tierce. Les feuilles de calcul Excel sont utilisées pour les besoins quotidiens d'ordonnancement, les horizons de planification courts et les scénarios avec deux produits au maximum. L'outil "Quintiq" développé est basé sur des règles de "glisser-déposer" pour l'ordonnancement des lots dans les pipelines et les laveries. À chaque événement de "glisser-déposer", l'outil met à jour les niveaux de stocks et vérifie si les contraintes de capacité de stockage sont

respectées. L'objectif de l'ordonnancement manuel est de répondre d'abord aux besoins des clients locaux et toute capacité de production et de distribution disponible restante est utilisée pour accumuler les stocks de produits d'export à la station terminale. Bien que l'ordonnancement manuel ait assuré la livraison continue du produit local à la station terminale au fil des ans, avec la demande croissante de produits d'export, il est devenu de plus en plus difficile de garantir la satisfaction des clients sans erreurs humaines.

Par conséquent, en considérant le problème d'ordonnancement intégré de la production et de la distribution par pipeline du Groupe OCP, l'objectif est de proposer des solutions d'ordonnancement détaillées directement applicables dans le monde réel, fournissant des solutions opérationnelles capables de répondre aux demandes de divers clients (locaux et internationaux) sur un horizon d'ordonnancement prédéfini, tout en respectant toutes les contraintes opérationnelles. Une solution au problème d'ordonnancement considéré devrait inclure :

- Toutes les décisions d'ordonnancement prises à chaque laverie, leurs dates de début et leurs durées.
- La séquence des lots de produits injectés et déchargés, leurs volumes, et les dates de début et de fin des opérations d'injection et de déchargement, en plus des périodes d'arrêt.
- La séquence et la durée de toutes les décisions prises aux unités de filtration et de transfert.
- Les niveaux de stock et les produits contenus dans tous les groupes de bacs à chaque période de l'horizon d'ordonnancement.

Le problème étudié traite l'ordonnancement des flux physiques continus de production de pulpe de phosphate et sa distribution par pipeline au niveau opérationnel, ainsi que de la gestion des stocks multiproduits. Étant donné la nature continue des lots de produits, qui peuvent être mélangés dans les bacs et répartis par les pipelines, ce problème considéré nécessite des cadres de modélisation uniques qui diffèrent de l'approche classique de modélisation "job shop", étant donné que les "items" discrets

sont difficiles à définir efficacement. La section suivante présente les approches de solution qui sont proposées dans les chapitres suivants.

4. APPROCHES DE SOLUTION

Dans cette section, un aperçu général des principales approches de solution utilisées pour aborder le problème d'ordonnancement de la production et de la distribution par pipeline traité dans cette thèse est présenté.

4.1. Programmation linéaire en nombres entiers mixtes

La programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) est une méthode d'optimisation mathématique qui intègre des variables de décision pouvant prendre des valeurs entières, étendant la programmation linéaire classique, qui implique la résolution d'un problème d'optimisation continue avec des contraintes linéaires ainsi qu'une fonction objectif linéaire (Bertsimas & Tsitsiklis, 1997). La programmation linéaire en nombres entiers mixtes permet de s'attaquer à un éventail plus large de problèmes, en particulier lorsque les variables de décision doivent représenter des valeurs discrètes telles que le nombre d'articles ou des choix binaires dans les opérations. Pour résoudre des programmes linéaires en nombres entiers mixtes, des méthodes adaptées telles que la méthode du simplexe (Dantzig, 1947) et l'algorithme du point intérieur (Karmarkar, 1984) peuvent être utilisées.

Un problème de MILP se compose d'une fonction objectif à maximiser ou à minimiser, représentée par une relation linéaire comme exprimée dans l'équation 1.1. Une fonction objectif à minimiser est équivalente à maximiser $-c^T x$. Les contraintes qui constituent le problème sont linéaires et peuvent être présentées dans les équations 1.2 et 1.3. Ici, c, x et b sont des vecteurs de taille n, et A est une matrice de taille $m \times n$. Le vecteur c contient les coefficients de la fonction objectif, le vecteur x représente les variables de décision du problème, et la matrice A, en plus du vecteur b, représente les contraintes du problème.

maximiser $c^T x$ (1.1)

sujet à: $Ax \leq b$ (1.2)

$x \geq 0$ (1.3)

L'espace des solutions $S = \{s \geq 0 | As \leq b\}$, également connu sous le nom de région faisable, est l'ensemble de toutes les solutions $s \in S$ qui satisfont les contraintes du problème MILP (1.2 et 1.3). Une solution optimale est une solution particulière s^* dans l'espace des solutions qui maximise la fonction objectif $c^T x$. La solution optimale s^* est définie dans l'équation 1.4.

$c^T s^* \geq c^T s \quad \forall\, s \in S$ (1.4)

La géométrie d'un espace de solutions peut être complexe, en particulier avec l'inclusion de variables entières, conduisant à un ensemble potentiellement disjoint et non convexe. Cette complexité est l'une des raisons principales pour lesquelles trouver une solution optimale peut être intensif en calcul et difficile. La recherche d'une solution optimale utilise souvent des techniques de recherche telles que les méthodes de branchement (*branch-and-bound*, *branch-and-cut, …*), et les méthodes de coupes de Gomory, pour naviguer et partitionner l'espace des solutions afin de trouver la meilleure valeur de la fonction objectif. Les solveurs modernes CPLEX, Gurobi ou GLPK sont souvent utilisés pour la résolution des modèles MILP.

L'efficacité de la programmation linéaire en nombres entiers mixtes de façon générale est souvent limitée lorsque la taille des instances devient grande. Le succès de la résolution des problèmes dépend de plusieurs facteurs, notamment la performance du solveur linéaire considéré, la puissance de calcul des machines utilisées et les méthodes de solution employées.

4.2. Approches heuristiques

Les heuristiques sont des approches de résolution qui s'appuient sur l'expérience ou le jugement pour produire des solutions satisfaisantes, bien que non optimales, aux

problèmes (Foulds, 1983). Cette approche se concentre sur l'obtention de solutions satisfaisantes de manière efficace et elle est particulièrement pratique dans les scénarios dans lesquels trouver une solution optimale à un problème est difficile en raison de sa complexité. Par conséquent, les heuristiques sont particulièrement pertinentes comme solution approximative pour les problèmes complexes, où le temps de résolution augmente de manière exponentielle ou factorielle avec la taille du problème.

Les stratégies heuristiques peuvent être classées en quatre procédures principales : construction, amélioration, analyse des composants et apprentissage (Foulds, 1983). Chaque stratégie sert un objectif spécifique, allant de la construction de solutions de manière incrémentale à l'affinement d'une solution existante ou à la décomposition de problèmes complexes en composants plus simples :

- **Stratégie de construction :** Construit une solution pièce par pièce à partir de zéro, en considérant la contribution potentielle de chaque composant à un bon résultat final.
- **Stratégie d'amélioration :** Commence avec une solution complète, puis l'améliore de manière itérative en apportant de petits changements.
- **Stratégie d'analyse des composants :** Décompose un grand problème en parties plus petites et gérables, résout chaque partie séparément, puis les combine.
- **Stratégie d'apprentissage :** Implique une méthode d'essais et d'erreurs où les décisions sont progressivement améliorées en fonction des résultats des choix précédents.

Cependant, la mise en œuvre des heuristiques présente des défis, principalement le risque de dériver des solutions trop éloignées de l'optimum, ce qui peut entraîner une variabilité dans la qualité des résultats. De plus, l'efficacité d'une heuristique peut être fortement dépendante des caractéristiques spécifiques des problèmes étudiés et des paramètres utilisés, ce qui peut limiter leur applicabilité universelle sans ajustement des paramètres ou modifications algorithmiques.

4.3. Simulation à événements discrets

La simulation est une approche analytique utilisée pour modéliser des systèmes et évaluer leur comportement dans divers scénarios. Elle permet la création d'une représentation virtuelle ou d'une modélisation mathématique d'un processus ou d'un système réel pour prédire les effets de différentes décisions et facteurs externes. L'une des approches de simulation couramment utilisées pour l'ordonnancement est la simulation à événements discrets, dans laquelle le fonctionnement d'un système est modélisé comme une séquence d'événements discrets dans le temps. Dans la simulation à événements discrets, le temps n'avance pas de manière continue, mais passe directement d'un événement à un autre. Chaque événement se produit à un instant particulier et marque un changement d'état dans le système. Ce type de simulation est particulièrement utile dans les environnements où les opérations peuvent être segmentées distinctement en événements individuels enregistrés chronologiquement.

Les composants-clés de la simulation à événements discrets incluent les événements, les variables d'état, une liste d'événements, une horloge de simulation, des générateurs de nombres aléatoires et la collecte de statistiques. Les événements sont des occurrences discrètes qui changent instantanément l'état du système, comme l'arrivée d'un client ou la défaillance d'une machine, par exemple. Les variables d'état représentent l'état actuel du système et ne sont mises à jour qu'aux occurrences des événements. La liste d'événements, ou calendrier d'événements, garde une trace de tous les événements planifiés et de leurs heures d'occurrence, permettant à la simulation de progresser en sautant d'un événement à l'autre. L'horloge de simulation suit le temps actuel dans la simulation, avançant par sauts de temps d'un événement à l'autre. Les systèmes modélisés par la simulation à événements discrets peuvent impliquer des incertitudes, comme le temps entre les arrivées des clients, qui sont simulées en utilisant des générateurs de nombres aléatoires selon des distributions de probabilité spécifiées. Une partie intégrante de la simulation à événements discrets est la collecte de données pour analyser les performances du système, y compris des mesures telles que les temps d'attente, le débit du système ou les taux d'utilisation des ressources.

Indépendamment du langage de simulation ou des environnements de simulation utilisés, il existe trois approches pour mettre en œuvre un modèle de simulation à événements discrets (Pritsker et al., 1997):

- **Approche par événements :** On définit les changements d'état qui surviennent aux instants d'événements. Dans cette approche, le système est modélisé comme une série d'événements instantanés qui changent l'état du système au fil du temps. Ces événements sont définis pour modéliser les changements d'état qui se produisent lorsqu'ils surviennent, en se concentrant sur la capture des événements discrets et de leur impact sur l'état du système.
- **Approche par processus :** On décrit les processus qui traitent les entités qui traversent le système. Cette approche modélise le système comme une série de processus visités par des entités passives suivant un flux de processus. Le flux de processus peut être prédéfini (plans de processus, par exemple) ou dépendant de l'état du système.
- **Approche par activité :** On décrit les activités dans lesquelles les différentes entités qui composent le système s'engagent. Également connue sous le nom de "*clock-driven simulation approach*", cette méthode modélise le système en utilisant un ensemble d'objets. Les variables d'état de chaque objet sont mises à jour simultanément à chaque tic-tac de l'horloge, en fonction des entrées actuelles et des valeurs précédentes des variables dynamiques. Elle fonctionne de manière synchronisée, progressant par étapes temporelles.

Ces approches offrent différentes façons de représenter et de simuler des systèmes en utilisant des techniques de simulation à événements discrets. Le choix d'une approche dépend de la nature du système, du type d'événements ou de processus impliqués et de l'environnement de simulation utilisé pour modéliser et analyser le problème d'ordonnancement.

5. CONCLUSION

Ce chapitre présente un aperçu de la gestion de la Supply Chain, du contexte industriel du problème de recherche étudié, une présentation générale de ses contraintes et objectifs, ainsi que les approches de solutions envisageables pour la résolution de ce problème.

Le problème étudié porte sur la production de la pulpe de phosphate dans les laveries et sa distribution via un réseau de pipelines aux clients locaux et internationaux, en plus de la gestion des stocks multiproduits. Nous nous intéressons à l'ordonnancement du flux continu de phosphate au niveau opérationnel, pour assurer une livraison continue et en temps voulu aux clients locaux et pour garantir des niveaux de stock suffisants aux clients internationaux en fonction des prévisions.

Pour résoudre le problème d'ordonnancement présenté, nous proposons les trois approches suivantes :

- **Une approche monolithique basée sur un modèle MILP en temps continu** qui permet de fournir des solutions optimales ou quasi-optimales au problème d'ordonnancement sur un horizon d'ordonnancement court.
- **Une approche heuristique basée sur une simulation à événements discrets (Approche par activité)** dans laquelle des solutions d'ordonnancement satisfaisantes sont construites de manière itérative sur la durée d'un horizon d'ordonnancement en temps discret.
- **Une approche dynamique basée sur un modèle MILP en temps discret** qui construit de manière itérative les solutions sur un horizon d'ordonnément glissant, suivie d'un post-traitement basé sur un MILP destinée à améliorer la qualité de la solution d'ordonnancement.

Chapitre 2 : Ordonnancement des pipelines multiproduits : Une analyse bibliométrique approfondi et une revue systématique de la littérature

Ce chapitre reproduit et étend les résultats et les conclusions de l'article publié suivant :

Mouad SIDKI, Tchernev NIKOLAY, Pierre FÉNIÈS, Libo REN, Selwa EL FIRDOUSSI, (2025). **Multiproduct Pipeline Scheduling: A comprehensive Bibliometric Analysis and a Systematic Literature Review**. Computers & Chemical Engineering, 108911.
https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2024.108911

1. INTRODUCTION

Les pipelines multiproduits représentent un élément clé de l'infrastructure de nombreuses industries, notamment les industries pétrolières et gazières, ainsi que les industries minières. Ces pipelines sont conçus pour transporter une variété de produits, tels que différentes qualités de pétrole, des produits chimiques et des pulpes, en séquence à travers le même pipeline. La capacité à ordonnancer efficacement les opérations de ces pipelines est cruciale non seulement pour l'efficacité opérationnelle du pipeline lui-même, mais aussi pour la Supply Chain plus large qu'ils cherchent à soutenir.

Les pipelines sont l'un des modes les plus fiables pour transporter de grandes quantités de produits sur de longues distances, offrant un flux continu et ininterrompu de matériaux (Rejowski & Pinto, 2003; Cafaro & Cerdá, 2004; Qiu et al., 2019). Ils sont plus économes en énergie par rapport au transport routier ou ferroviaire (Herran et al., 2010) grâce à l'utilisation de routes directes, réduisant ainsi considérablement les distances de trajet et la consommation d'énergie. Le coût énergétique de maintenance

d'un pipeline est inférieur à celui de la maintenance d'une flotte de camions ou de wagons et de leur infrastructure associée. De plus, les pipelines ont une empreinte carbone plus faible, contribuant ainsi à limiter la pollution de l'air (Taherkhani et al., 2017), et en raison de leur nature statique, caractérisée par le mouvement de la cargaison plutôt que du transporteur (Mostafaei et al., 2021b), ils sont moins influencés par les conditions météorologiques et sont considérés comme étant l'un des modes de transport les plus sûrs (Liao et al., 2018a).

Les pipelines jouent un rôle crucial en reliant les sites de production aux clients, en assurant un approvisionnement continu en produits et en réduisant efficacement la dépendance aux bacs de stockage surdimensionnés (Sidki et al., 2023). Traditionnellement, dans de nombreuses entreprises, l'ordonnancement des pipelines a été effectué par des spécialistes de l'ordonnancement qui se fondent sur leur expérience, en utilisant des outils internes et des calculs manuels, souvent à l'aide de feuilles de calcul. Ces méthodes manuelles se concentrent généralement sur des topologies de pipeline plus simples et plus petites, avec un ensemble limité de contraintes opérationnelles. Bien que cette approche rende le problème plus gérable, elle peut ne pas représenter le problème réel d'ordonnancement des pipelines de façon suffisamment fidèle. Ainsi, avec la complexité et l'échelle croissantes des systèmes de pipeline, des solutions d'ordonnancement plus sophistiquées sont devenues nécessaires. La nature complexe des problèmes d'ordonnancement de pipeline est notable. Par exemple, un problème simple de pipeline multiproduits à source unique soumis à des fenêtres de livraison est NP-complet (Jittamai, 2004).

Bien que les problèmes d'ordonnancement de pipelines multiproduits aient attiré une attention grandissante au cours des dernières décennies, il existe peu d'études se concentrant sur des revues de littérature approfondies et exhaustives. Par exemple, la majorité des travaux existants tendent à se concentrer sur la modélisation mathématique de ces problèmes et sur la comparaison de la littérature existante en termes de formulation temporelle et volumique, de contraintes opérationnelles, de techniques de solution et d'objectifs (Zaghian & Mostafaei, 2016; Chen et al., 2019; Xu et al., 2021). À notre connaissance, à l'exception du travail réalisé par Li et al. (2021a), il n'existe pas d'articles offrant une revue systématique de la littérature basée sur un cadre de

recherche structuré, ou fournissant une analyse bibliométrique du problème d'ordonnancement des pipelines multiproduits. Dans ce chapitre, nous présentons une analyse bibliométrique approfondie, en utilisant des données provenant de trois bases de données bibliographiques, réputées pour fournir un aperçu général des recherches menées sur le sujet étudié. De plus, nous réalisons une revue systématique approfondie de la littérature pour résumer les recherches existantes, en utilisant comme guide un cadre de recherche détaillé.

Le reste de ce chapitre est organisé comme suit. La section 2 est dédiée à une analyse bibliométrique des problèmes d'ordonnancement de pipelines multiproduits, suivie d'une revue systématique de la littérature dans la section 3 et d'une discussion sur les résultats obtenus et les potentielles futures recherches dans la section 4.

2. ANALYSE BIBLIOMETRIQUE

La première étape de cette analyse consiste à cartographier le domaine de recherche sur l'ordonnancement des pipelines multiproduits de 2000 à 2023. La requête de recherche "*multiproduct AND pipeline AND scheduling*" a été utilisée dans les trois bases de données bibliographiques suivantes : Web of Science, ScienceDirect et Scopus, en sélectionnant des paramètres de recherche avancés, limitant les requêtes aux titres, mots-clés et résumés. Cela permet d'identifier efficacement les articles pertinents et de gérer le volume initial des résultats de recherche. La recherche a été restreinte à la littérature publiée en anglais, donnant un total de 284 publications (Figure 2.1), formant un ensemble de données préliminaires. La suppression de 121 doublons a circonscrit par la suite la recherche sur 163 publications. Les titres et résumés ont ensuite été examinés selon leur pertinence, ce qui a conduit à l'exclusion de deux articles non pertinents. Par conséquent, l'analyse bibliométrique a été réalisée avec 161 publications. Cet ensemble de données sera affiné pour une revue systématique approfondie de la littérature dans la section 3.

Les critères d'inclusion englobent des articles principalement axés sur l'ordonnancement des pipelines multiproduits et des sujets étroitement liés, en considérant les articles de revues de recherche, les actes de conférences, les chapitres

de livres et les articles de revue de littérature, avec pour prérequis l'accès aux résumés complets pour une analyse approfondie. Pour réaliser l'analyse bibliométrique, les données contenant des informations bibliographiques ont été extraites au format BibTeX à partir des trois bases de données. Ces fichiers BibTeX ont été standardisés pour une uniformité de format et combinés en un seul ensemble de données. L'analyse a été effectuée en utilisant RStudio via l'application web Biblioshiny du package R Bibliometrix, suivie de l'utilisation de Microsoft Excel pour affiner les résultats et créer des représentations visuelles des données.

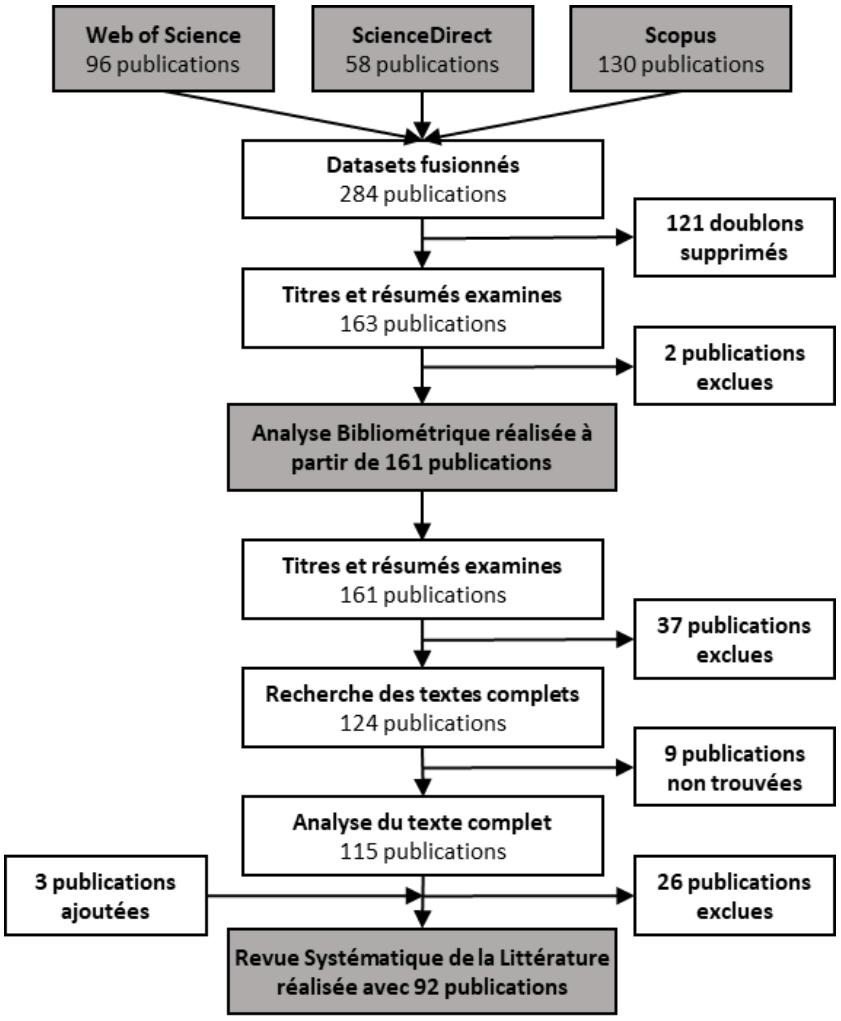


Figure 2.1. Protocole de recherche

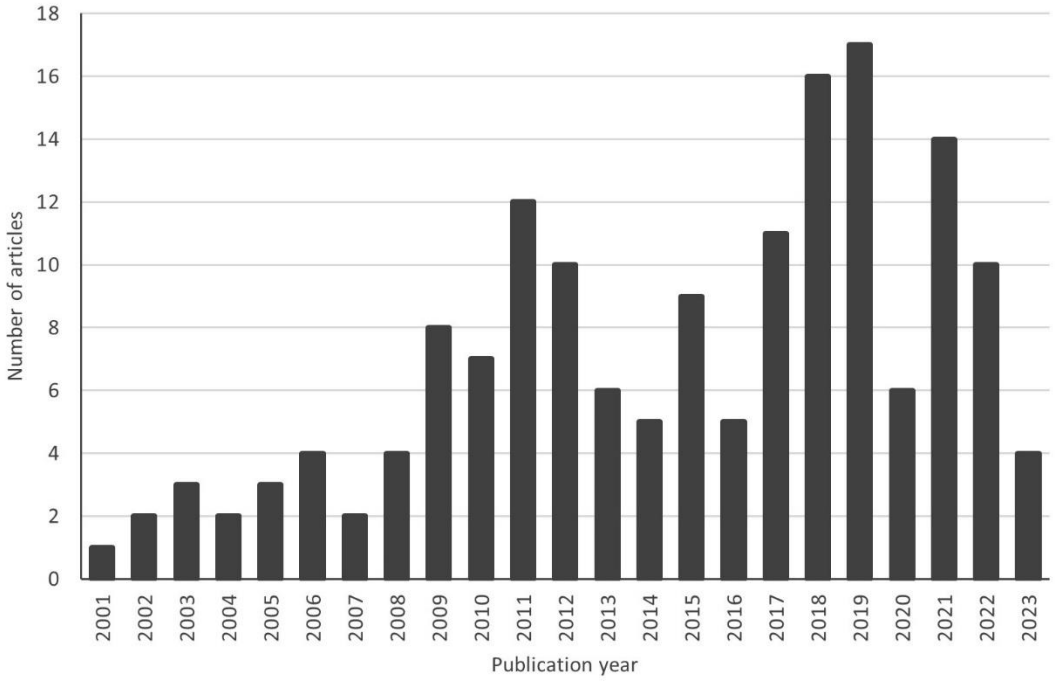


Figure 2.2. Répartition des articles par année de publication

Le domaine de recherche montre un taux moyen de croissance annuel de 6,5 %, indiquant des progrès constants et un intérêt croissant. Comme le montre la Figure 2.2, le nombre de contributions sur le sujet présente une tendance à la hausse au fil des ans, avec l'année 2019 comme étant la plus productive avec 17 articles, suivie de l'année 2021 avec 14 articles. L'analyse a identifié divers types de documents, notamment des articles de recherche, des articles de conférences, des chapitres de livres et des articles de revue de littérature. Les articles de recherche sont les plus prédominants, représentant environ 70 % du total des contributions comme le montre la Figure 2.3. Parmi les documents, seuls quatre sont des articles de revue, avec une seule revue approfondie sur l'ordonnancement des pipelines multiproduits par Li et al. (2021a). Cela démontre une lacune dans la littérature, en particulier dans les travaux de revue systématique.

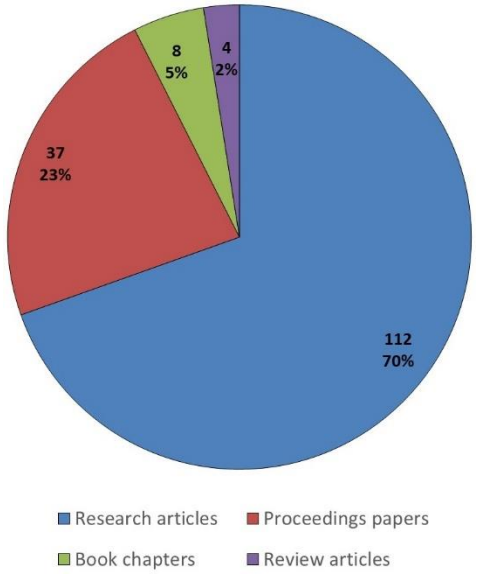


Figure 2.3. Répartition des articles par type

Le nuage de mots représenté dans la Figure 2.4 illustre la fréquence des mots-clés utilisés dans les articles étudiés. La taille des mots est corrélée au nombre de leurs utilisations. "Scheduling" et "Multiproduct pipeline" sont les mots-clés les plus utilisés. Les termes "mixed integer linear programming" et "optimization" sont respectivement le troisième et le quatrième plus courant, indiquant une préférence dans la littérature pour rechercher des solutions d'ordonnancement optimales, utilisant des modèles de programmation linéaire en nombres entiers mixtes. Le cinquième mot-clé, "continuous-time", met en exergue une préférence pour les modèles en temps continu plutôt qu'en temps discret dans les travaux. La littérature priorise les solutions d'ordonnancement détaillées, fournissant le timing précis et les débits des opérations, ce qui est indiqué par l'utilisation du terme "detailed scheduling" en septième position. Des termes tels que "logistics", "inventory management", "transportation", "distribution scheduling" et "pump scheduling" impliquent que, outre le transport étant le principal objectif, d'autres éléments logistiques telles que la gestion des stocks sont considérés en raison de l'importance des équilibres de stockage des bacs et des contraintes de capacité pour créer une solution d'ordonnancement complète. Des méthodes comme la "discrete-event simulation", la "heuristic method" et "decomposition approach" apparaissent dans le nuage de mots mais sont moins fréquentes. Notamment, le manque de mots-clés liés à la production indique un accent de la recherche sur l'ordonnancement des

pipelines, l'ordonnancement de la production semblant être une donnée d'entrée pour le problème d'ordonnancement, plutôt qu'un enjeu d'ordonnancement.

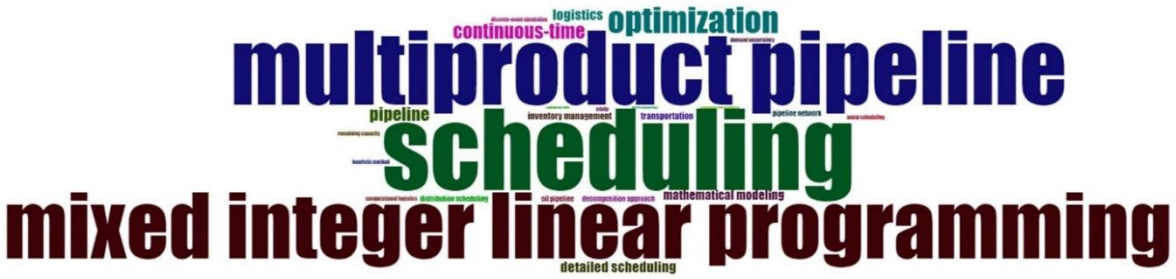


Figure 2.4. Fréquence d'utilisation des mots-clés

Le diagramme à barres de la Figure 2.5 permet de visualiser la répartition des articles publiés dans divers sources. "Computers and Chemical Engineering" est en tête avec 32 articles, suivi de "Industrial and Engineering Chemistry Research" et "Computer Aided Chemical Engineering", qui contribuent également de manière notable. Des journaux tels que "Chemical Engineering Research and Design" et "European Journal of Operational Research" démontrent quant à eux une représentation modérée. Des sources moins citées dans ce domaine, contribuant avec au moins 3 articles, incluent "IFAC-PapersOnLine", "Oil and Gas Journal" et "Operational Research".

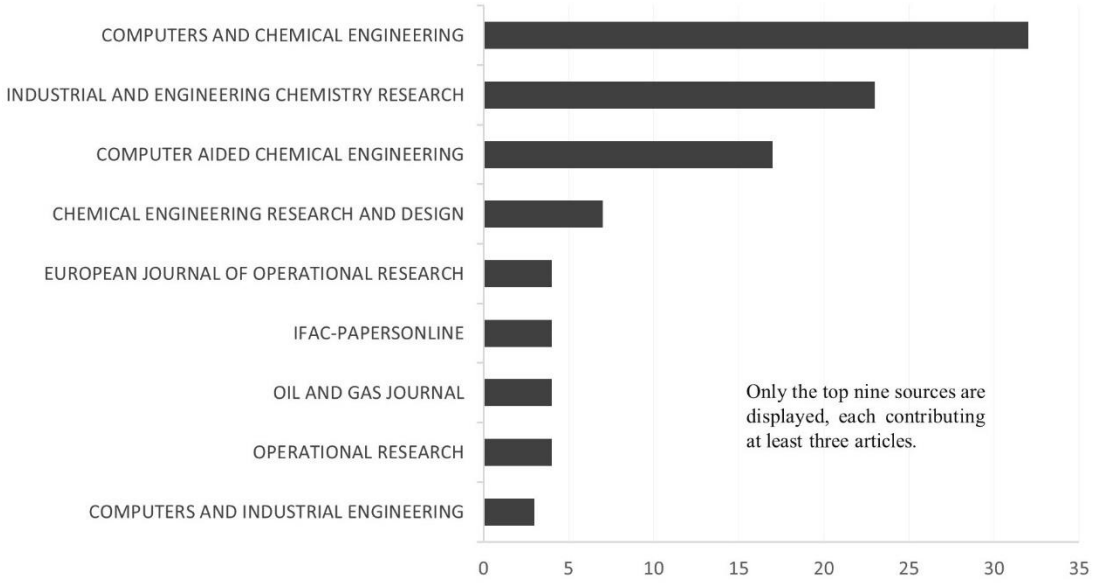


Figure 2.5. Répartition des articles par sources

Le domaine de l'ordonnancement des pipelines multiproduits a mobilisé 223 auteurs, chacun contribuant à la recherche collective, avec une moyenne de 3,71 co-auteurs par document. Le taux de co-auteur international est de 8,7 %. Le graphique à barres de la Figure 2.6 illustre les contributions des auteurs, avec Cafaro D. et Liang Y. étant les plus prolifiques, chacun ayant contribué 25 publications. Ils sont suivis par Relvas S., Zhang H., Castro P., Liao Q., et Cerdá J. en termes de nombre de publications.

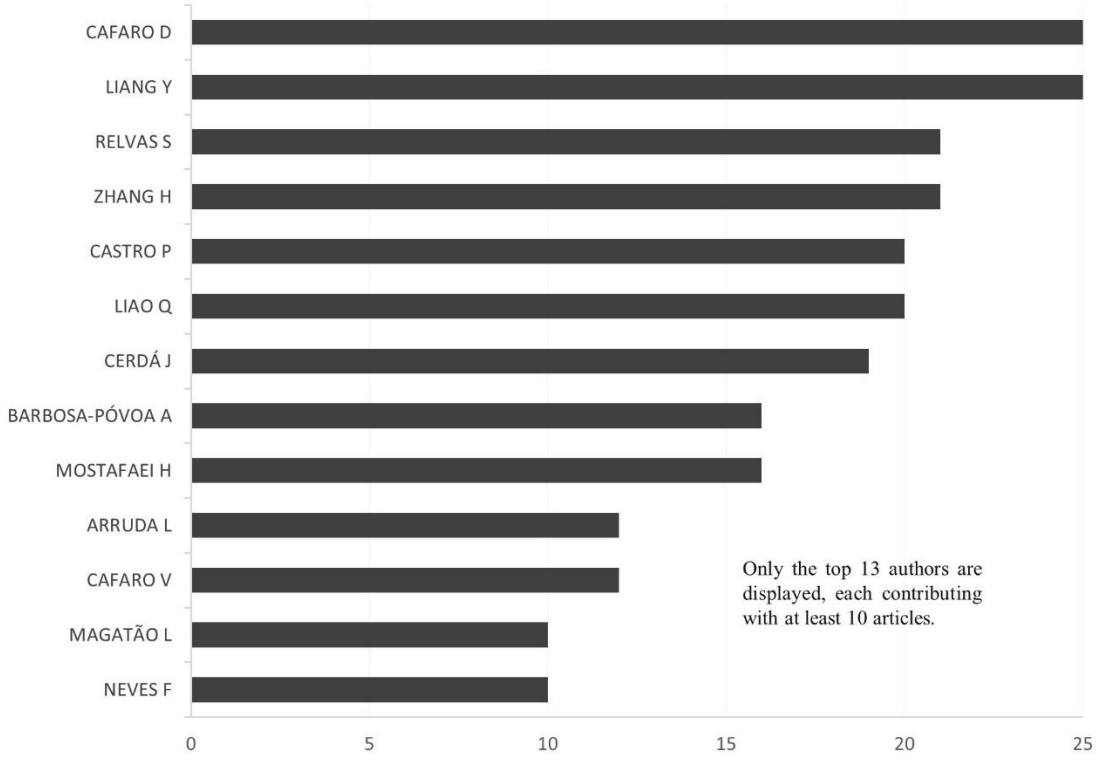


Figure 2.6. Auteurs les plus contributifs

Un nombre croissant d'institutions dans le monde entier est activement engagé dans la recherche sur les problèmes d'ordonnancement des pipelines multiproduits. La Figure 2.7 présente une carte du monde qui illustre le nombre d'occurrences des affiliations des auteurs par pays dans le dataset des articles, avec les principales affiliations comme suit. Le Brésil est en tête avec 54 occurrences, provenant principalement de Federal University of Technology – Paraná, de University of São Paulo, de Federal University of Rio de Janeiro et de Federal University of Rio Grande do Norte, avec respectivement 20, 10, 4 et 4 occurrences. La Chine est en deuxième

position, avec 50 occurrences, provenant principalement de China University of Petroleum, avec 41 contributions. L'Iran est en troisième position avec 43 occurrences réparties entre des institutions telles que Amirkabir University of Technology, Islamic Azad University, et Azarbaijan Shahid Madani University. Le Portugal suit avec 40 occurrences, toutes liées à University of Lisbon (ULisboa). Le Japon a 21 occurrences, University of Tokyo en comptant 17. Les 12 occurrences de la France proviennent principalement de l'Université Clermont Auvergne et du Laboratoire LINEACT, tandis que les États-Unis contribuent avec 11 contributions, principalement de Lamar University et University of Southern California. D'autres instituts affiliés avec un minimum de quatre occurrences incluent l'Université de Tlemcen en Algérie, Complutense University en Espagne, Aalto University en Finlande, Pannonia in Hungary en Hongrie et l'Université Mohammed VI Polytechnique au Maroc. La recherche dans ce domaine est principalement orientée vers des problèmes réels, la plupart des travaux étudiant des problèmes d'ordonnancement pratiques soit de manière indépendante dans leur propre pays, soit en collaboration internationale.

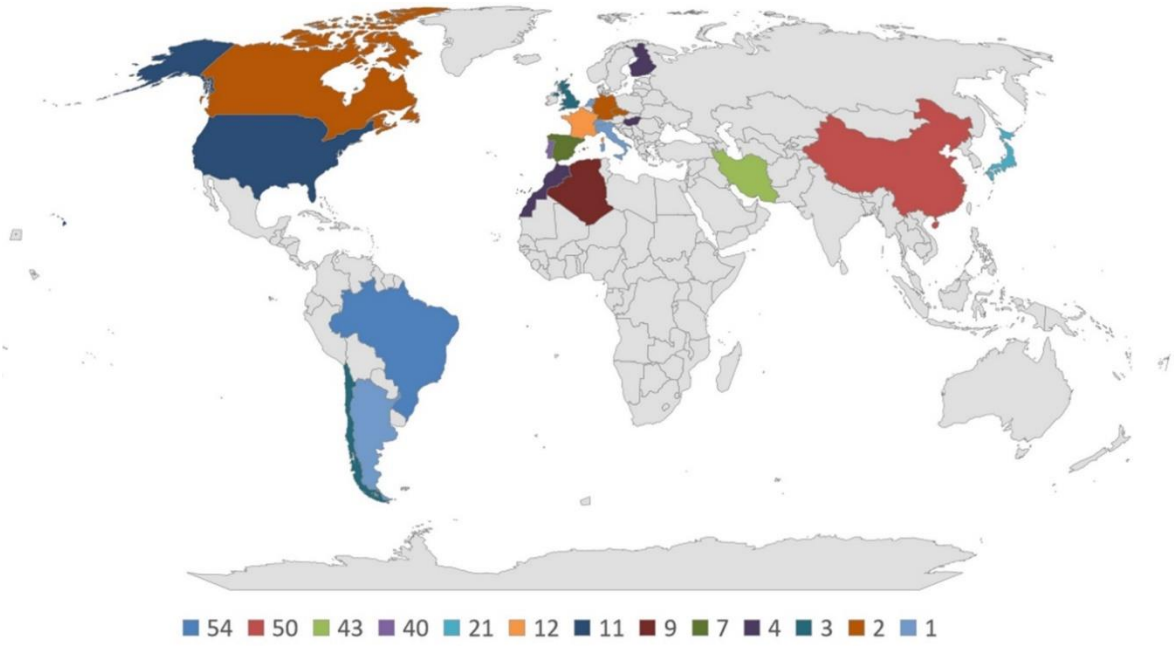


Figure 2.7. Répartition par pays du dataset des articles

En conclusion, le domaine de l'ordonnancement des pipelines multiproduits se caractérise par une croissance constante, un accent sur l'optimisation et les modèles opérationnels détaillés, et un vaste paysage de publications représentant une variété d'applications industrielles. Bien que les problèmes pratiques et réels en soient le principal objectif, il y a de la place pour des travaux de revue plus approfondis pour synthétiser les résultats et orienter les recherches futures. La collaboration internationale et la répartition géographique des contributions soulignent l'importance universelle de ce domaine.

3. REVUE SYSTEMATIQUE DE LA LITTERATURE

3.1. Méthodologie

Comme illustré dans la Figure 2.1, l'ensemble initial de 161 articles sélectionnés pour l'analyse bibliométrique a subi un processus de raffinement minutieux pour la revue systématique de la littérature. Après une révision approfondie des titres et des résumés ainsi que l'exclusion des articles dont les textes complets n'ont pas été obtenus, 46 publications ont été supprimées. L'analyse des textes complets a ensuite conduit à l'exclusion de 26 publications supplémentaires en raison de leur manque de pertinence par rapport au sujet. Au cours du processus de révision, 3 publications externes ont été incorporées en raison de leur pertinence, aboutissant à un total de 92 articles qui ont été examinés en profondeur et systématiquement catégorisés pour la revue. La grille d'analyse des articles étudiés, illustrant les informations structurées collectées au cours du processus de révision, est présentée dans le Tableau 2.1.

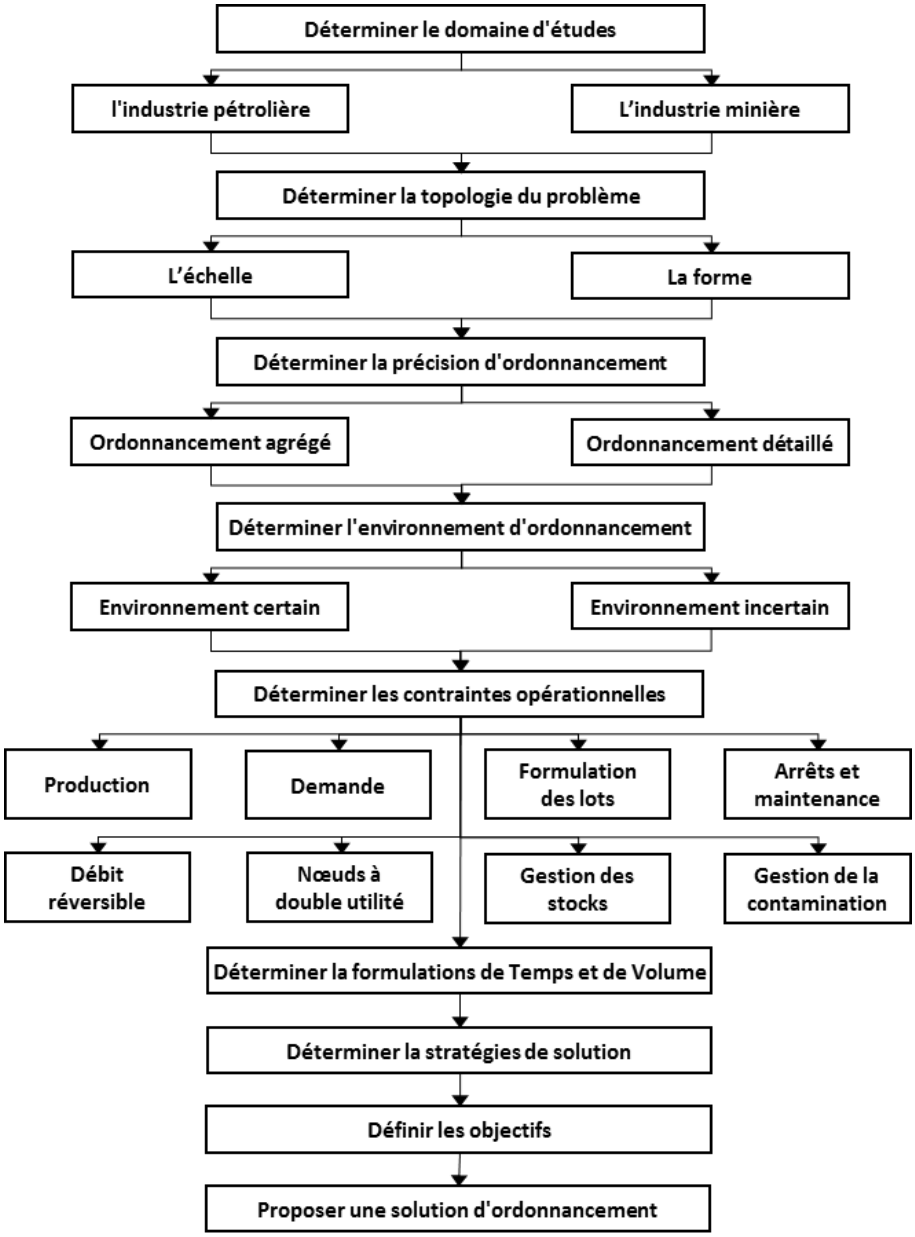


Figure 2.8. Cadre d'analyse

Tableau 2.1. Grille d'analyse des articles de la revue systématique de la littérature

Articles	Domaine		Échelle de topologie				Forme de topologie			Précision	Environnement			Contraintes opérationnelles					Temps		Stratégies de solution								Objectifs	
	Industrie pétrolière	Industrie minière	Production	Sources	Destinations	Lignes	Droite	En arbre	En maille	Agrégé	Détaillé	Certain	Incertain	Débit réversible	Nœuds à double utilité	Maintenance	Séquences interdites	Contrôle qualité en bac	Discret	Continu	Optimisation classique	Programmation par contraintes	Heuristique	Métaheuristique	Simulation	Basées sur les données	Décomposition	Opérationnel	Économique
(Abdellaoui et al., 2021)	X		4	1	2	1	X				X	X					X			X	X								X
(Asl et al., 2022)	X		4	1	3	1	X				X	X					X			X	X						X		X
(Asl & MirHassani, 2019)	X		5	1	1	1	X			X			X				X		X		X						X		X
(Bamoumen et al., 2021)		X	3	1	2	3		X			X	X			X		X	X		X	X							X	
(Boschetto et al., 2010)	X		14	4	10	30			X		X	X		X	X		X			X	X		X				X	X	
(Bueno et al., 2020)	X		7	4	4	7			X		X	X		X	X		X			X	X		X				X	X	
(Cafaro et al., 2010)	X		4	1	5	1	X				X	X							X						X				X
(Cafaro et al., 2011)	X		4	1	5	1	X				X	X								X	X		X		X				X
(Cafaro et al., 2012)	X		4	1	5	1	X				X	X								X	X								X
(Cafaro et al., 2015a)	X		4	1	5	1	X				X	X								X	X								X
(Cafaro et al., 2015b)	X		5	2	3	1	X				X	X			X					X	X								X
(Cafaro & Cerdá, 2004)	X		4	1	5	1	X			X		X					X			X	X								X
(Cafaro & Cerda, 2008a)	X		4	1	5	1	X			X		X					X			X	X								X
(Cafaro & Cerda, 2008b)	X		6	1	1	1	X				X	X					X	X		X	X								X
(Cafaro & Cerda, 2009)	X		3	2	3	1	X			X		X								X	X								X
(Cafaro & Cerda, 2010)	X		5	2	3	1	X			X		X			X		X			X	X							X	X
(Cafaro & Cerda, 2011a)	X		4	1	5	3		X		X		X					X			X	X								X
(Cafaro & Cerdá, 2011b)	X		7	1	7	4		X		X		X				X	X			X	X								X
(Cafaro & Cerdá, 2012)	X		4	2	6	6			X	X		X			X	X	X			X	X							X	X
(Cafaro & Cerda, 2014)	X		4	2	3	1	X				X	X		X	X	X	X			X	X								X
(Castro, 2010)	X		4	1	6	3		X		X		X			X		X			X	X							X	
(Castro, 2017)	X		4	2	5	4			X		X	X		X	X	X	X			X	X							X	
(Castro & Mostafaei, 2017)	X		6	1	4	1	X				X	X			X		X			X	X							X	
(Castro & Mostafaei, 2019)	X		4	1	6	3		X			X	X			X		X			X	X							X	

Tableau 2.1. (Continuation)

Articles	Domaine		Échelle de topologie				Forme de topologie			Précision	Environnement			Contraintes opérationnelles					Temps		Stratégies de solution								Objectifs	
	Industrie pétrolière	Industrie minière	Production	Sources	Destinations	Lignes	Droite	En arbre	En maille	Agrégé	Détaillé	Certain	Incertain	Débit réversible	Nœuds à double utilité	Maintenance	Séquences interdites	Contrôle qualité en bac	Discret	Continu	Optimisation classique	Programmation par contraintes	Heuristique	Métaheuristique	Simulation	Basées sur les données	Décomposition	Opérationnel	Économique
(Chen et al., 2017a)	X		3	2	5	1	X				X	X							X		X		X	X				X	
(Chen et al., 2017b)	X		3	1	5	1	X				X	X							X		X							X	
(Chen et al., 2019)	X		4	2	5	4			X		X	X			X		X			X	X							X	
(Csontos et al., 2022a)	X		4	2	11	19			X		X	X			X		X		X						X				
(Csontos et al., 2022b)	X		4	2	11	19			X		X	X			X		X		X						X				
(De Souza Filho et al., 2013)	X		5	4	4	8			X		X	X			X		X		X		X		X						X
(Dimas et al., 2018)	X		6	1	1	1	X				X	X					X	X	X		X								X
(Felizari et al., 2009)	X		10	3	6	15			X			X					X			X	X	X						X	X	
(Ghaffari-Hadigheh & Mostafaei, 2015)	X		4	1	3	1	X				X	X					X			X	X								X
(Gleizes et al., 2012)	X		4	1	5	1	X				X	X							X		X				X				
(Haoran et al., 2018)	X		3	1	4	1	X				X	X								X	X		X	X				X	
(Herran et al., 2010)	X		4	2	5	7			X		X	X		X	X		X		X		X								X
(Huang et al., 2022)	X		3	1	8	1	X			X		X							X		X							X	
(Li et al., 2021b)	X		3	1	6	1		X	X		X		X							X	X								X
(Liang et al., 2012)	X		3	1	13	1	X				X	X								X	X		X					X	
(Liao et al., 2018a)	X		3	1	4	1	X				X	X								X	X								X
(Liao et al., 2018b)	X		3	1	4	1	X				X	X							X		X								X
(Liao et al., 2018c)	X		3	6	1	4		X			X	X							X		X		X						X
(Liao et al., 2019a)	X		3	1	5	1	X				X	X								X						X		X	
(Liao et al., 2019b)	X		5	2	3	1	X				X	X			X		X			X	X							X	
(Liao et al., 2019c)	X		3	1	5	4		X			X	X			X		X			X	X							X	
(Liao et al., 2019d)	X		4	3	6	6			X		X	X			X		X			X	X								X
(Magatao et al., 2011)	X		6	1	1	1	X				X	X		X						X	X	X					X		X
(Magatão et al., 2012)	X		12	4	10	30			X	X		X		X	X					X	X						X	X	
(Magatão et al., 2015)	**X**		**35**	**4**	**10**	**30**			**X**		**X**	**X**		**X**	**X**		**X**			**X**	**X**		**X**				**X**	**X**	

Tableau 2.1. (Continuation)

Articles	Domaine		Échelle de topologie				Forme de topologie				Précision	Environnement		Contraintes opérationnelles					Temps		Stratégies de solution							Objectifs	
	Industrie pétrolière	Industrie minière	Production	Sources	Destinations	Lignes	Droite	En arbre	En maille	Agrégé	Détaillé	Certain	Incertain	Débit réversible	Nœuds à double utilité	Maintenance	Séquences interdites	Contrôle qualité en bac	Discret	Continu	Optimisation classique	Programmation par contraintes	Heuristique	Métaheuristique	Simulation	Basées sur les données	Décomposition	Opérationnel	Économique
(Meira et al., 2018)	X		5	1	3	1	X				X	X					X		X		X		X				X	X	
(Meira et al., 2021)	X		6	2	3	1	X				X	X			X		X		X		X		X				X		X
(MirHassani et al., 2011)	X		4	1	3	1	X				X	X					X	X	X		X		X						X
(MirHassani et al., 2013)	X		3	2	3	1	X				X	X			X		X			X	X								X
(MirHassani & BeheshtiAsl, 2013)	X		5	1	1	1	X					X					X	X	X				X						X
(MirHassani & Jahromi, 2011)	X		4	1	3	3		X			X	X					X			X	X								X
(Moradi et al., 2019)	X		4	1	3	1	X				X	X					X			X	X		X				X		X
(Moradi & MirHassani, 2016)	X		6	1	1	1	X				X		X				X		X		X								X
(Mori et al., 2007)	X		8	3	6	15			X		X	X		X						X					X				
(Mostafaei et al., 2015a)	X		4	1	6	3		X			X	X								X	X								X
(Mostafaei et al., 2015b)	X		5	1	4	1	X				X	X			X		X			X	X								X
(Mostafaei et al., 2015c)	X		4	1	6	3		X			X	X					X			X	X								X
(Mostafaei et al., 2016)	X		5	2	3	1	X				X	X			X		X			X	X							X	X
(Mostafaei et al., 2021a)	X		4	1	3	1	X				X	X			X		X			X	X							X	X
(Mostafaei et al., 2021b)	X		4	1	3	1	X				X	X				X	X		X		X								X
(Mostafaei & Castro, 2017)	X		5	1	3	1	X				X	X			X					X	X							X	
(Mostafaei & Hadigheh, 2014)	X		4	1	5	1	X				X	X					X			X	X								X
(Polli et al., 2017)	X		9	2	4	6			X		X	X		X			X		X		X		X				X	X	
(Qiu et al., 2019)	X		5	4	1	4	X				X		X			X			X		X								X
(Quinteros et al., 2019)	X		6	1	3	1	X				X	X					X			X	X								X
(Rejowski & Pinto, 2002)	X		6	1	3	1	X				X	X					X		X		X								X
(Rejowski & Pinto, 2003)	X		6	1	5	1	X				X	X					X		X		X								X
(Rejowski & Pinto, 2004)	X		4	1	5	1	X				X	X					X		X		X								X

Tableau 2.1. (Continuation)

Articles	Domaine		Échelle de topologie				Forme de topologie			Précision		Environnement		Contraintes opérationnelles				Temps		Stratégies de solution								Objectifs	
	Industrie pétrolière	Industrie minière	Production	Sources	Destinations	Lignes	Droite	En arbre	En maille	Agrégé	Détaillé	Certain	Incertain	Débit réversible	Nœuds à double utilité	Maintenance	Séquences interdites	Contrôle qualité en bac	Discret	Continu	Optimisation classique	Programmation par contraintes	Heuristique	Métaheuristique	Simulation	Basées sur les données	Décomposition	Opérationnel	Économique
(Rejowski & Pinto, 2008)	X		4	1	5	1	X			X		X					X			X	X								X
(Relvas et al., 2006)	X		6	1	1	1	X				X	X					X	X		X	X							X	
(Relvas et al., 2007)	X		6	1	1	1	X				X	X					X	X		X	X							X	
(Relvas et al., 2009)	X		6	1	1	1	X				X	X				X	X	X		X	X		X					X	
(Relvas et al., 2013)		X	6	1	1	1	X				X	X					X	X	X		X							X	
(Sidki et al., 2022)		X	3	1	2	1	X				X	X			X	X	X		X		X							X	
(Sidki et al., 2023)	X		3	3	2	4			X		X	X			X		X			X	X							X	
(Stebel et al., 2012)	X		14	4	10	30			X	X		X		X	X					X	X							X	
(Strachotova & Dyntar, 2021)	X		2	2	2	1	X				X	X							X						X				
(Taherkhani, 2020)	X		4	3	6	3		X			X	X			X		X			X	X							X	X
(Taherkhani et al., 2017)	X		4	2	6	3		X			X		X		X		X			X	X								X
(Taherkhani et al., 2020)	X		4	2	5	3		X			X	X			X		X			X	X								X
(Tamura Lopes et al., 2010)	X		32	4	10	30			X		X	X		X			X				X	X	X				X		
(Tsunoda Meira et al., 2020)	X		3	1	5	1	X				X	X				X	X		X		X		X	X			X	
(Xin et al., 2019)	X		3	1	7	1	X				X	X								X	X					X		X	
(Xu et al., 2021)	X		3	1	5	1	X				X	X								X	X						X	X	X
(Yan et al., 2021)	X		3	1	5	4		X			X	X					X			X	X						X	X	
(Yu et al., 2020)	X		4	1	4	1	X				X	X					X			X	X						X		X
(Zaghian & Mostafaei, 2016)	X		4	1	5	1	X				X	X					X			X	X								X
(Zhou et al., 2019)	X		3	1	4	1	X				X	X								X	X								X

La revue systématique de la littérature sur l'ordonnancement des pipelines multiproduits suit une approche structurée, comme décrit dans le cadre fourni à la Figure 2.8. Le processus commence par l'identification du domaine d'étude, en notant que la majorité des recherches se concentre sur l'industrie pétrolière. Un sous-ensemble plus restreint d'études examine l'ordonnancement des slurry pipelines dans l'industrie minière du phosphate (Bamoumen et al., 2021), un domaine de recherche émergent initié par (Bamoumen et al., 2019). Cette étape initiale dicte le contexte opérationnel et les contraintes spécifiques qui sont communes ou uniques à chaque industrie. Ensuite, la revue examine la topologie des systèmes de pipelines considérés dans les problèmes d'ordonnancement, en fonction de leur échelle et de leur forme. L'échelle se réfère au nombre de sources, de pipelines, de destinations et de nœuds, tandis que la forme se réfère à la structure du système de pipeline, qu'il soit linéaire, ramifié avec une structure en arbre, ou bien entrelacé dans un réseau en forme de maille.

La précision de l'ordonnancement est ensuite examinée, distinguant l'ordonnancement agrégé de l'ordonnancement détaillé. L'ordonnancement agrégé fournit des solutions avec une vue d'ensemble, tandis que l'ordonnancement détaillé fournit une répartition plus fine des mouvements de produits et des dates de transport dans les pipelines. La revue considère ensuite les environnements d'ordonnancement. De plus, elle examine les contraintes opérationnelles considérées, en se concentrant sur la manière dont elles sont intégrées et le niveau de détail avec lequel elles sont traitées. Enfin, la revue examine les méthodes par lesquelles le temps et le volume sont formulés, les stratégies utilisées pour résoudre les problèmes d'ordonnancement et les objectifs considérés.

3.2. Le domaine d'étude

Dans les industries pétrolières (Rejowski & Pinto, 2003; Cafaro & Cerdá, 2004; Liao et al., 2018b) et minières (Bamoumen et al., 2021; Sidki et al., 2023), les solutions d'ordonnancement des pipelines multiproduits cherchent à définir la séquence des lots à transporter, en plus des dates d'injection et de réception des lots. Pour la modélisation en conditions réelles des processus industriels, différentes contraintes spécifiques à

chaque industrie doivent être prises en compte, y compris les contraintes liées à la production, au transport et au stockage. Le processus de production dans l'industrie pétrolière est généralement modélisé avec un débit constant ou un plan de production prédéfini et des raffineries pouvant produire simultanément tous les produits. En revanche, la production dans l'industrie minière du phosphate est organisée de manière séquentielle puisqu'une laverie ne peut traiter qu'un produit à la fois à partir d'une liste de produits possibles, et qu'une durée de configuration est requise en cas de changement de produit, en plus d'une contrainte de volume minimal de production à respecter. Une autre différence entre les industries pétrolières et minières est la manière dont la contamination est gérée entre les lots dans les pipelines. Dans l'industrie pétrolière, soit un "plug" est utilisé pour séparer les produits risquant la contamination, soit il n'est pas autorisé que des paires de produits hautement contaminables soient adjacentes dans les pipelines. Dans l'industrie du phosphate, un volume d'eau est injectépour séparer les lots de différents produits. De plus, la gestion des stocks diffère entre les deux industries : dans l'industrie du phosphate, certains bacs de stockage peuvent être utilisés pour stocker différents produits à différentes périodes, nécessitant des approches sophistiquées pour éviter la contamination dans les bacs de stockage, tandis que dans l'industrie pétrolière, chaque produit a des bacs de stockage dédiés.

3.3. La topologie des systèmes de pipelines

L'ordonnancement des pipelines varie considérablement en termes de complexité de modélisation et de résolution, allant des systèmes de pipelines unidirectionnels simples reliant une unité de production à un nœud de destination (Figure 2.9) à des réseaux complexes contenant plusieurs pipelines, sources et destinations. Nous considérons trois types de topologies : pipeline droit, réseau de pipelines en arbre et réseau de pipelines en maille.

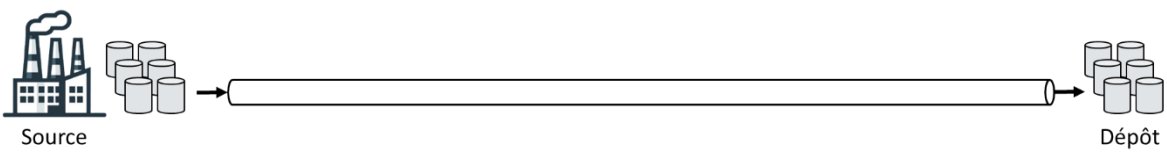


Figure 2.9. Un pipeline droit avec une source et une destination

Les topologies de pipelines droits sont catégorisées en fonction du nombre de sources et de destinations : une seule source et une seule destination (Cafaro & Cerda, 2008b; Dimas et al., 2018), une seule source et plusieurs destinations (Moradi et al., 2019; Huang et al., 2022) et plusieurs sources et une ou plusieurs destinations (MirHassani et al., 2013; Cafaro et al., 2015b; Chen et al., 2017a). La Figure 2.10 illustre un exemple de pipeline droit avec plusieurs sources et destinations. Les pipelines droits ont un chemin unique pour tous les lots de produits planifiés, limitant les possibilités de routage par rapport aux topologies en arbre et en maille. L'ordonnancement dans ce cas se concentre généralement sur la détermination de la séquence et des dates des injections et des arrivées des lots de produits, ainsi que sur la gestion des interfaces contaminées entre les différents lots de produits. Cependant, même avec sa topologie relativement simple, l'ordonnancement des pipelines droits peut être un défi en raison de considérations telles que les débits variables et la gestion des stocks de produits.

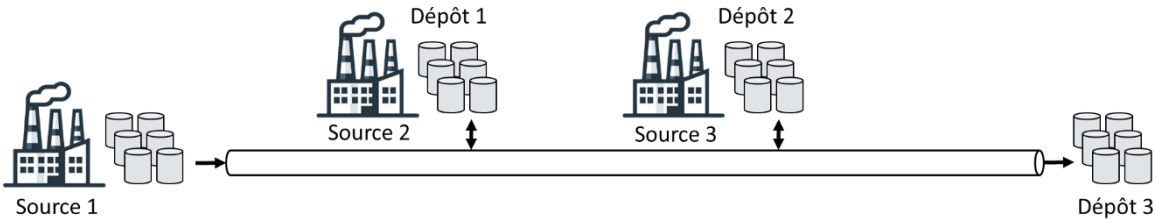


Figure 2.10. Un pipeline droit avec plusieurs sources et destinations

Les réseaux de pipelines en arbre se caractérisent par leur structure ramifiée émanant d'une ligne principale. Dans de tels réseaux, le pipeline principal part d'une station d'entrée et se ramifie pour livrer des produits à divers terminaux. En fonction du nombre de niveaux de ramification, nous pouvons distinguer deux types : un système de pipeline en arbre à un seul niveau se compose d'un tronc principal à partir duquel plusieurs branches de pipeline droit s'étendent (Cafaro & Cerda, 2011a; MirHassani & Jahromi, 2011; Mostafaei et al., 2015a; Mostafaei et al., 2015c; Taherkhani, 2020); et les réseaux de pipelines en arbre à plusieurs niveaux comportent un tronc principal à partir duquel des arbres secondaires peuvent se ramifier (Liao et al., 2019c; Taherkhani et al., 2020; Yan et al., 2021). Ces arbres secondaires peuvent, à leur tour, devenir des troncs principaux pour d'autres niveaux de ramification, créant une structure

arborescente à plusieurs niveaux. La Figure 2.11 illustre un exemple de réseau de pipelines en arbre à deux niveaux.

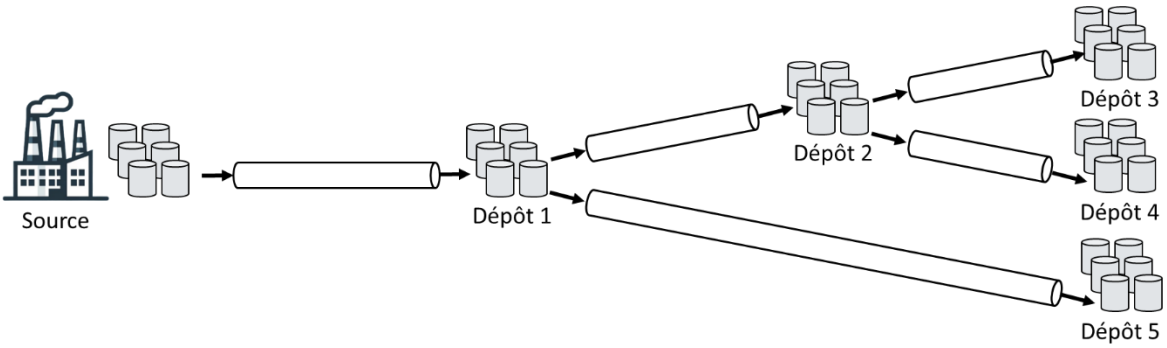


Figure 2.11. Un réseau de pipelines en arbre à deux niveaux

Les réseaux de pipelines en maille se caractérisent par la présence de plusieurs pipelines interconnectés, avec plusieurs terminaux d'entrée et de destination. Contrairement aux pipelines droits, les réseaux de pipelines en maille offrent plusieurs chemins alternatifs pour qu'un lot se déplace d'un point d'entrée à une destination assignée. Cette flexibilité peut être avantageuse en termes d'efficacité opérationnelle et de résilience aux perturbations. Cependant, elle ajoute également une couche de complexité à l'ordonnancement des opérations. De plus, l'ordonnancement de ces réseaux implique la prise en compte des arrêts de pipelines, l'utilisation de routes préférentielles dans certains cas, des solutions de suivi des lots pour surveiller les mouvements, les réceptions, les fractionnements et les injections des lots, ainsi que la contamination potentielle des produits (Cafaro & Cerdá, 2012; Liao et al., 2019d). La Figure 2.12 illustre un exemple de réseau de pipelines en maille.

La topologie des systèmes de pipelines influence de manière significative la complexité de modélisation et le coût lié à la résolution des problèmes d'ordonnancement. La littérature existante se concentre principalement sur des problèmes d'ordonnancement de pipelines à petite échelle, tels que les problèmes de pipelines droits. Des topologies plus complexes comme les réseaux en maille attirent de plus en plus d'attention des chercheurs et la conception d'algorithmes de résolution plus performants reste un défi scientifique.

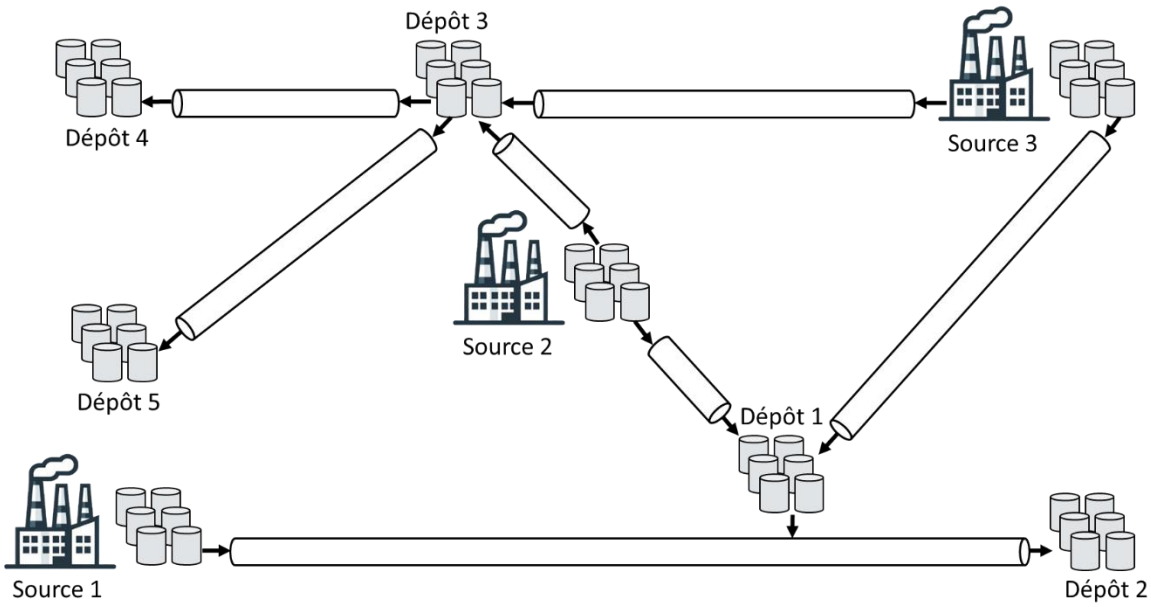


Figure 2.12. Un réseau de pipelines en maille

3.4. Précision de l'ordonnancement

Deux niveaux de détail sont considérés pour les problèmes d'ordonnancement des pipelines multiproduits : l'ordonnancement agrégé et l'ordonnancement détaillé. L'ordonnancement agrégé, également connu sous le nom d'ordonnancement approximatif, est un plan de haut niveau qui définit la séquence d'injection, les tailles et les destinations des lots. Cependant, il ne spécifie pas le temps exact et le débit de chaque opération d'injection et de réception. Par conséquent, les ordonnancements agrégés ne peuvent pas être utilisés directement pour guider les opérations réelles des pipelines et doivent être affinés en ordonnancements détaillés pour fournir le temps et le volume spécifiques de chaque opération d'injection et de réception.

Pour l'ordonnancement agrégé, (Cafaro & Cerdá, 2004) adopte la première formulation en temps continu pour le problème d'ordonnancement des pipelines multiproduits au niveau agrégé, en utilisant un modèle MILP. Le modèle proposé peut répondre aux demandes exactes des clients sans surplus et prend en compte les périodes de coût énergétique de pointe pour un pipeline droit à source unique et destinations multiples. Les travaux ultérieurs de (Rejowski & Pinto, 2008; Cafaro & Cerda, 2009;

Castro, 2010) ont introduit des modèles MILP axés sur l'ordonnancement agrégé des pipelines droits liés à plusieurs sources, permettant l'injection d'un seul lot à une période donnée. Plus tard, (Cafaro & Cerda, 2010) ont introduit des améliorations pour permettre les injections simultanées de lots. La portée de la recherche a continué de s'élargir, avec des topologies de pipelines plus complexes explorées au niveau agrégé. (Cafaro & Cerda, 2011a) ont considéré un système de pipeline en arbre et (Cafaro & Cerdá, 2012) ont considéré un système de pipeline en maille.

Les modèles d'ordonnancement détaillés fournissent le temps et le débit spécifiques de chaque opération d'injection et de réception, divisant les intervalles de temps en plus de détails par rapport à l'ordonnancement agrégé. Les premières recherches sur les modèles d'ordonnancement détaillés se sont principalement concentrées sur les pipelines à topologie linéaire. (Rejowski & Pinto, 2002, 2003) sont l'une des premières contributions à l'ordonnancement détaillé, utilisant un modèle MILP en temps discret pour un système de pipeline droit à destinations multiples.

L'ordonnancement détaillé peut être abordé de deux manières : l'ordonnancement direct et l'ordonnancement basé sur la décomposition. Dans l'approche d'ordonnancement direct, un modèle d'ordonnancement détaillé est directement établi à partir des données initiales (Mostafaei & Hadigheh, 2014; Chen et al., 2017b), résolvant un modèle monolithique, capable de fournir une solution d'ordonnancement détaillée. D'autre part, l'approche basée sur la décomposition développe un modèle d'ordonnancement agrégé, fournissant des solutions utilisées comme entrée par un modèle d'ordonnancement détaillé (Cafaro et al., 2011; Cafaro et al., 2015a). Cette approche est bénéfique lorsqu'il s'agit de topologies de pipelines complexes ou lorsqu'un compromis entre la taille du problème et la performance computationnelle est nécessaire. Avec les avancées dans les solutions de modélisation et de résolution, les modèles d'ordonnancement détaillés ont été étendus aux pipelines avec des structures complexes, comme (Mostafaei et al., 2015a; Chen et al., 2019).

3.5. Environnement déterministe VS incertain

En fonction de la nature et des objectifs des problèmes d'ordonnancement étudiés, ceux-ci peuvent être modélisés dans un environnement déterministe ou incertain. L'ordonnancement déterministe opère sous la présomption d'un environnement stable et prévisible. Cependant, dans des situations réelles, des incertitudes telles que les fluctuations de la demande et les pannes d'équipement peuvent fréquemment survenir. Pour tenir compte de ces facteurs, l'ordonnancement dans des environnements incertains est inévitable.

3.5.1 Environnement déterministe

Dans un environnement d'ordonnancement déterministe, tous les paramètres tels que la demande, la disponibilité des équipements, la capacité de stockage et la capacité de transport sont prédéterminés. Un tel ordonnancement est particulièrement efficace dans des environnements stables et prévisibles. Il existe deux principaux types d'ordonnancement déterministe : l'ordonnancement statique et l'ordonnancement dynamique.

L'ordonnancement statique vise à fournir une solution d'ordonnancement sur toute la durée de l'horizon d'ordonnancement, sans envisager d'ajuster la solution pendant sa mise en œuvre. Il peut être divisé en deux sous-catégories : l'ordonnancement basé sur l'offre (supply-based) et l'ordonnancement orienté vers la demande (demand-oriented) (Li et al., 2021a). Pour l'ordonnancement basé sur l'offre, le programme d'injection des lots est prédéterminé et l'accent est mis sur la détermination d'un ordonnancement pour les opérations de réception (Mori et al., 2007; Liang et al., 2012; Chen et al., 2017a; Liao et al., 2019a; Zhou et al., 2019). En revanche, l'ordonnancement orienté vers la demande est adopté lorsque les injections des stations d'entrée sont considérées comme des variables de décision, ce qui le rend davantage adapté aux problèmes où les séquences des lots d'injection sont difficiles à déterminer (MirHassani et al., 2013; Relvas et al., 2013; Cafaro & Cerda, 2014; Liao et al., 2019d; Mostafaei et al., 2021a).

L'ordonnancement dynamique reconnaît les incertitudes inhérentes aux systèmes de pipelines multiproduits. Il vise à ajuster la solution d'ordonnancement en fonction des entrées déterministes qui changent au fil du temps, le rendant ainsi plus adaptable aux scénarios réels. Dans l'ordonnancement dynamique, il existe deux principaux modèles : l'ordonnancement réactif et l'ordonnancement à horizon glissant.

L'ordonnancement réactif vise à ajuster la solution d'ordonnancement en réponse à certains événements au fur et à mesure qu'ils se produisent, en tenant compte des variations de la demande, des changements de séquence des produits, des arrêts de pipeline, de la modification du volume des lots, de l'ajustement du débit et des variations de la capacité de stockage. Il formule les événements incertains via des expressions mathématiques et les inclut comme contraintes dans les modèles d'ordonnancement statique. Relvas et al. (2007) propose une formulation MILP avec une approche algorithmique en deux étapes pour l'ordonnancement réactif pour un problème d'ordonnancement de pipeline droit multiproduit. La première étape est axée sur l'obtention d'une solution d'ordonnancement déterministe, tandis que la deuxième étape intègre systématiquement les modifications nécessaires de l'ordonnancement. En revanche, l'ordonnancement à horizon glissant (Cafaro & Cerda, 2008a; MirHassani et al., 2011; Meira et al., 2018, 2021) utilise une approche de prise de décision séquentielle pour générer la solution d'ordonnancement dans un horizon glissant. À mesure que la mise en œuvre de la solution d'ordonnancement initiale progresse, à la fin de chaque période, la solution est réinitialisée en fonction de nouvelles données. L'ordonnancement réactif est plus axé sur les événements, s'ajustant aux changements ou aux perturbations spécifiques, tandis que l'ordonnancement à horizon glissant est proactif, apportant des ajustements continus en temps réel en fonction des tendances prévues et des conditions actuelles.

3.5.2. Environnement incertain

L'ordonnancement des pipelines multiproduits dans des environnements incertains est un sujet d'intérêt croissant dans la littérature récente. Ceci est dû à la possibilité d'incidents, tels que les fluctuations de la demande et du débit, ainsi que les pannes d'équipement. Ces incidents peuvent rendre les solutions d'ordonnancement

déterministes irréalisables, d'où la nécessité d'améliorer la robustesse de l'ordonnancement et de réduire la fréquence des ajustements. Les méthodes utilisées pour traiter les incertitudes incluent la programmation stochastique, les méthodes basées sur des scénarios et l'optimisation robuste.

Contrairement aux approches déterministes, la programmation stochastique reconnaît la variabilité des paramètres clés par le biais de distributions de probabilité. En tenant compte d'une gamme de scénarios futurs potentiels et de leurs probabilités, la programmation stochastique aide à développer des solutions d'ordonnancement non seulement réalisables dans différents scénarios, mais aussi adaptés pour une performance globale. Comme peu de travaux traitent généralement l'ordonnancement dans des environnements incertains, ceux qui utilisent la programmation stochastique sont également peu nombreux (Asl & MirHassani, 2019; Qiu et al., 2019; Taherkhani et al., 2017).

Plutôt que de se baser sur des distributions de probabilité spécifiques des paramètres incertains, l'optimisation robuste vise à trouver des solutions réalisables et quasi-optimales pour toutes les réalisations possibles des paramètres dans un intervalle prédéfini. Par conséquent, la robustesse dans un modèle d'ordonnancement peut réduire le risque posé par les paramètres incertains et ainsi également réduire le nombre d'ajustements des solutions d'ordonnancement. Parmi tous les articles étudiés, seuls quelques-uns explorent l'optimisation robuste pour traiter l'incertitude (Moradi & MirHassani, 2016; Li et al., 2021b). Malgré les efforts réalisés, la recherche sur l'ordonnancement des pipelines multiproduits dans un environnement incertain au niveau opérationnel est très limitée. La plupart des études se sont principalement concentrées sur la gestion des chaînes de valeur pétrolières en aval, dans des conditions d'incertitude aux niveaux stratégiques et tactiques (Li et al., 2021b).

3.6. Contraintes opérationnelles

Pour une compréhension approfondie des problèmes d'ordonnancement des pipelines multiproduits, un examen détaillé des contraintes opérationnelles est essentiel. Ces contraintes opérationnelles, qui incluent la production, la demande, le

batching, les arrêts, le débit réversible, les nœuds à double utilité, la gestion des stocks et la gestion de la contamination, sont analysées pour comprendre l'efficacité et l'applicabilité des modèles d'ordonnancement dans des scénarios réels. En examinant la manière dont ces contraintes sont abordées, la revue ne met pas seulement en évidence les différentes avancées, mais identifie également les lacunes de la recherche et les pistes de recherche potentielles futures.

3.6.1. Production

Dans le contexte de l'industrie pétrolière, le pétrole brut subit divers processus pour être transformé en une gamme de produits dans les raffineries. Ces produits comprennent l'essence, le diesel, le kérosène, le mazout et les matières premières pétrochimiques, entre autres. Les raffineries incorporent une série d'unités et de processus, tels que la distillation, le craquage et le reformage, chacun étant conçu pour produire des types spécifiques de produits ou pour améliorer leur qualité. Le processus initial dans la plupart des raffineries est la distillation, où le pétrole brut est chauffé et séparé en divers composants en fonction de leurs points d'ébullition. Des processus supplémentaires, tels que le craquage catalytique, décomposent les molécules plus lourdes pour produire des produits plus légers et plus valorisés comme l'essence.

Dans l'industrie minière du phosphate, les laveries jouent un rôle similaire à celui des raffineries, mais dans un contexte différent. Leur fonction principale est de produire de la pulpe, un mélange semi-liquide composé d'eau et de minerai finement broyé. Les laveries sont essentielles pour traiter le minerai extrait afin de séparer les minéraux précieux des roches stériles. Ce processus implique de broyer le minerai jusqu'à obtenir consistance fine, qui est ensuite traitée par des unités de flottation, de valorisation et de séparation. Le fonctionnement des laveries doit garantir que les produits sont adaptés au transport par pipeline.

Dans les modèles d'ordonnancement des pipelines multiproduits, les unités de production ne sont souvent pas incluses explicitement, avec l'hypothèse que les ressources d'entrée sont suffisantes pour tous les lots planifiés. Cependant, l'absence de modélisation détaillée de la production peut entraîner des incohérences

opérationnelles entre l'ordonnancement du pipeline et la production réelle des unités de production, surtout lorsque les bacs de stockage ne sont pas suffisamment grands pour absorber de grandes perturbations. Relvas et al. (2013) suppose que la capacité de production des raffineries dépasse la demande des pipelines et le modèle de (Bamoumen et al., 2021) ne prend pas en compte la production des laveries.

Une part importante des modèles de la littérature fonctionne sous l'hypothèse d'un plan de production prédéfini ou d'un débit de production fixe pour chaque produit sur toute la durée de l'horizon d'ordonnancement. Ces modèles, lorsqu'ils sont couplés à une bonne infrastructure, peuvent générer des solutions d'ordonnancement réalisables en conditions réelles. Par exemple, dans l'industrie pétrolière, la grande capacité des bacs de stockage agrégés peut fournir plusieurs jours d'autonomie, absorbant les fluctuations potentielles de production, sans violer les contraintes de stockage. Cependant, cette considération ne s'applique pas aux problèmes liés à des capacités de stockage limitées. Boschetto et al. (2010) utilise des prévisions de plan de production pour un mois comme entrée. Plus tard, Stebel et al. (2012) intègre des considérations opérationnelles dans la validation des plans de production des raffineries, réduisant l'écart entre les opérations planifiées et réelles. (Dimas et al., 2018 ; Mostafaei & Castro, 2017) supposent que les débits entrants vers les bacs de stockage des raffineries sont constants. De plus, Sidki et al. (2023) considèrent quant à eux l'ordonnancement détaillé des laveries, nécessitant la production d'un produit à la fois, une durée de configuration en cas de changement de produit, en plus d'une contrainte de quantité minimale de production.

3.6.2. Demande

Dans les scénarios d'ordonnancement réels, les profils de demande de produits sont souvent caractérisés par une variabilité significative, due aux tendances du marché et au comportement des clients. Cette variabilité nécessite une représentation détaillée des profils de demande pour des solutions d'ordonnancement applicables dans le monde réel. La plupart des travaux dans la littérature considèrent la consommation de produits à la fin de l'horizon d'ordonnancement (Herran et al., 2010; Castro & Mostafaei, 2017).

Cette approche implique généralement le calcul d'un débit de demande moyen pour chaque produit, basé sur les données historiques et l'analyse actuelle du marché.

Diviser l'horizon d'ordonnancement en plusieurs fenêtres temporelles offre une approche plus détaillée et réaliste de la représentation de la demande. L'incorporation de la demande variable dans les modèles d'ordonnancement est facilitée par la formulation en temps discret. Dans une telle approche, l'horizon d'ordonnancement est divisé en intervalles de temps prédéfinis, permettant la spécification de la demande à chaque intervalle. Pour la formulation en temps continu, les longueurs des intervalles de temps sont des données de sortie de la solution d'ordonnancement, ce qui rend la représentation de la demande variable plus difficile. MirHassani & BeheshtiAsl (2013) utilisent une formulation en temps discret avec des considérations de demande quotidienne, Relvas et al. (2006) emploient une formulation en temps continu, transformant la demande quotidienne des clients en données continues et Bueno et al. (2020) utilisent une formulation en temps continu, avec la demande représentée comme des fonctions linéaires par morceaux pour chaque produit à chaque nœud sur la longueur de l'horizon d'ordonnancement.

Dans la littérature, la demande est catégorisée comme obligatoire ou permise pour les ruptures. La demande obligatoire nécessite la satisfaction totale des commandes des clients dans un délai spécifié, tandis que les ruptures sont acceptables dans des scénarios où la demande peut ne pas être satisfaite en raison des limitations de capacité ou des inefficacités opérationnelles. Les modèles avec des contraintes de satisfaction des demandes clients obligatoires peuvent incorporer une tolérance pour la demande non satisfaite. (Liao et al., 2018b) permettent une déviation de 5%, tandis que (Quinteros et al., 2019) permettent une déviation de 7,5%. Cette considération permet d'incorporer des solutions favorables dans l'espace de solution qui seraient autrement exclues dans des scénarios de tolérance de 0%. Pour prévenir une insatisfaction excessive des clients dans des scénarios où les ruptures sont permises , un coût de rupture de stock est introduit dans les fonctions objectives, comme observé dans (Cafaro & Cerda, 2008b; Ghaffari-Hadigheh & Mostafaei, 2015; Haoran et al., 2018; Liao, Zhang, et al., 2019; Tsunoda Meira et al., 2020). De plus, la représentation d'un

environnement incertain est essentielle lorsque la demande subit des fluctuations significatives qui dévient largement des prévisions.

3.6.3. Formulation des lots

Le batching consiste à déterminer la séquence des lots de produits, leurs volumes et leurs opérations de pompage à travers un système de pipelines. De plus, au début de l'horizon d'ordonnancement, il existe des lots préexistants dans le pipeline. Ces lots initiaux sont déchargés en premier avant les lots nouvellement ordonnancés. Felizari et al. (2009) utilisent la programmation par contraintes (CP) pour un problème de séquencement de lots dans un réseau de pipelines multiproduits complexe, composé de 15 pipelines, 10 produits et de multiples sources et destinations. Relvas et al. (2009) utilisent une approche heuristique pour générer une séquence de lots qui est un input pour un modèle MILP. De plus, Polli et al. (2017) proposent une approche collaborative qui intègre un algorithme heuristique avec un modèle MILP. L'algorithme heuristique priorise l'expédition des lots pour respecter les délais, tandis que le modèle MILP optimise la séquence de ces lots en tenant compte des diverses contraintes opérationnelles.

Le volume total demandé pour un produit au cours de l'horizon d'ordonnancement est divisé en lots plus petits et plus gérables. Ces lots doivent être planifiés pour arriver dans des fenêtres temporelles spécifiques pour répondre aux demandes des clients. La taille et la séquence des lots jouent un rôle important dans la qualité globale des solutions d'ordonnancement. D'une part, des lots de plus grande taille peuvent simplifier le processus d'ordonnancement. Cependant, elles augmentent simultanément le risque de problèmes de capacité de stockage et de ruptures de stock. D'autre part, des tailles de lots trop petites et plus fréquentes entraînent de plus grandes quantités de contamination d'interface, augmentant le coût global du traitement des produits contaminés. Par conséquent, une bonne plage de tailles de lots limite l'espace de solutions et améliore la qualité des solutions d'ordonnancement. Des travaux tels que (Cafaro & Cerdá, 2004; Cafaro & Cerda, 2011a; Relvas et al., 2013; Zaghian & Mostafaei, 2016; Chen et al., 2019; Liao et al., 2019d) considèrent des contraintes de limitation de la taille des lots.

Les contraintes de suivi des lots sont cruciales pour définir les mouvements des lots et leurs changements de taille pendant chaque période de l'horizon d'ordonnancement. Un lot dans un pipeline peut être suivi soit en utilisant des coordonnées volumétriques, soit des calculs basés sur le temps. Les coordonnées volumétriques suivent la position exacte des interfaces de lots en fonction du volume cumulé des lots précédemment injectés, à partir de l'origine du pipeline (Cafaro & Cerda, 2009; Liao et al., 2018c). Le transport précis des lots peut être garanti sans connaître la position exacte d'un lot dans le pipeline à une période donnée. Le temps d'arrivée exact d'un produit à l'extrémité d'un pipeline peut être calculé en fonction de l'heure de début de son injection, du débit du pipeline et des arrêts programmés (Sidki et al., 2022).

3.6.4. Arrêts et maintenance

Les arrêts de pipeline peuvent se produire pour diverses raisons, y compris la maintenance, les réparations d'urgence ou l'introduction de nouveaux lots à des nœuds intermédiaires, forçant certains segments de pipeline à s'arrêter. Minimiser le nombre et la durée des arrêts aide à maximiser des objectifs tels que les volumes transportés par exemple. Dans un pipeline droit avec plusieurs destinations, les opérateurs peuvent contrôler le débit du pipeline en répartissant le flux de produit entrant entre un dépôt intermédiaire et le segment de pipeline suivant, permettant au flux restant de continuer en aval à un débit réduit. Parfois, le flux complet est détourné vers un dépôt intermédiaire, ce qui rend les segments de pipeline suivants inactifs. Les livraisons simultanées de produits à plusieurs terminaux de réception peuvent réduire considérablement les durées de redémarrage et d'arrêt en assurant des livraisons de produits plus stables à des débits réduits vers les dépôts les plus éloignés (Cafaro et al., 2012; Ghaffari-Hadigheh & Mostafaei, 2015; Mostafaei et al., 2016).

La majorité des travaux existants dans la littérature considèrent les arrêts de pipelines pendant l'horizon d'ordonnancement. En raison du coût élevé associé aux redémarrages des pompes et des perturbations opérationnelles qu'ils peuvent causer, les arrêts de pipeline sont indésirables s'ils ne sont pas nécessaires. Une solution pour limiter les occurrences d'arrêts consiste à les incorporer comme contraintes ou pénalités

dans la fonction objectif. (Herran et al., 2010; Mostafaei et al., 2016; Zaghian & Mostafaei, 2016; Xin et al., 2019; Zhou et al., 2019; Li et al., 2021b) réduisent la fréquence des redémarrages des pompes en considérant leur nombre ou leur coût comme un élément de la fonction objectif. (Cafaro et al., 2010; Cafaro & Cerdá, 2011b; Magatao et al., 2011; Taherkhani et al., 2017; Meira et al., 2021) pénalisent le temps ou le coût associé au temps d'inactivité des pipelines dans leurs fonctions objectives. De plus, des objectifs opérationnels tels que la minimisation du makespan peuvent avoir un impact positif sur la réduction des arrêts des pipelines (Cafaro & Cerdá, 2012; Mostafaei & Castro, 2017).

Pour une représentation réelle des processus opérationnels, la maintenance est un paramètre d'entrée critique pour une solution d'ordonnancement. Le planificateur de pipeline doit gérer de manière proactive les niveaux de stocks pour s'assurer que l'approvisionnement n'est pas perturbé, reflétant un comportement de contrôle prédictif. La maintenance préventive est normalement programmée à des périodes prédéterminées. Elle peut être totale, impliquant un arrêt complet des pipelines, ou partielle, où seul un segment du pipeline est arrêté. Dans la littérature étudiée, seuls les modèles adoptant une formulation en temps discret considèrent les intervalles de temps de maintenance. Dans ce cas, les temps de début et de fin de toutes les périodes de l'horizon d'ordonnancement sont prédéfinis, permettant la définition de contraintes associées à la maintenance sur des intervalles de temps choisis. MirHassani & BeheshtiAsl (2013) développent une méthode heuristique pour l'ordonnancement des pipelines multiproduits, avec une seule source et une seule destination, intégrant des arrêts de pipeline planifiés. Plus tard, Mostafaei et al. (2021b) développent un modèle MILP en temps discret pour des pipelines droits avec une seule raffinerie et plusieurs dépôts, permettant aux opérations de pompage de s'étendre sur plusieurs créneaux horaires, ce qui peut conduire à des solutions plus efficaces avec moins d'opérations de changement de pompes. De plus, le cadre d'ordonnancement permet l'inclusion de la maintenance planifiée. Meira et al. (2021) proposent un modèle MILP en temps discret pour l'ordonnancement et la gestion des stocks des systèmes de pipelines droits multiproduits avec plusieurs sources et destinations. Le modèle proposé prend en compte la maintenance des pipelines et des bacs de stockage.

La gestion des arrêts dans les problèmes d'ordonnancement des pipelines multiproduits est un défi qui concerne à la fois les considérations opérationnelles et économiques. Les approches de solutions doivent inclure des représentations permettant l'intégration de la maintenance pour une application réelle des processus opérationnels. La formulation en temps continu et les problèmes avec des topologies complexes, telles que les structures en arbre et en maille, n'ont pas encore intégré les intervalles de temps de maintenance prédéfinis.

3.6.5. Débit réversible

Le débit réversible se réfère à la possibilité de changer la direction du flux dans les pipelines. Cette opération implique l'insertion de lots auxiliaires dans les pipelines, ce qui nécessite de suspendre le pompage des lots initialement programmés jusqu'à l'achèvement de l'inversion du flux. Le débit réversible peut affecter l'efficacité globale et les taux d'utilisation des systèmes de pipelines. Cependant, déterminer le nombre précis de réversions de flux nécessaires pour chaque pipeline peut être une tâche difficile, vu qu'elle nécessite une prise en compte minutieuse de divers facteurs, y compris les propriétés des différents produits transportés, la demande des clients et les contraintes de capacité des systèmes de pipelines. Les travaux prenant en compte les débits réversibles dans la littérature étudiée sont : (Boschetto et al., 2010; Herran et al., 2010; Tamura Lopes et al., 2010; Magatao et al., 2011; Magatão et al., 2012, 2015; Cafaro & Cerda, 2014; Castro, 2017; Polli et al., 2017; Bueno et al., 2020).

Tamura Lopes et al. (2010) présentent un modèle hybride qui combine la programmation par contraintes en plus des approches heuristiques et de simulation, pour traiter l'ordonnancement d'un système de pipelines structuré en maille composé de 30 pipelines. L'approche proposée permet de minimiser les inversions de flux en choisissant des itinéraires avec la plus grande différence entre les dates d'arrivée les plus précoces et les dates d'échéance pour un volume de produit donné. Cafaro & Cerda (2014) introduisent une formulation MILP en temps continu pour un pipeline droit à sources multiples. Le modèle développé est capable de déterminer les temps optimaux pour les inversions de flux et de sélectionner les lots auxiliaires appropriés. Plus tard, Castro (2017) introduit une formulation MILP en temps continu pour l'ordonnancement

des réseaux de pipelines avec des contraintes de débit réversible. Le modèle proposé est générique et peut être adapté à diverses structures de réseau.

3.6.6. Nœuds à double utilité

Les nœuds à double utilité influencent l'efficacité opérationnelle, la flexibilité et les performances globales des systèmes de pipelines, réduisant le besoin d'infrastructures supplémentaires ou de délais rallongés pour répondre aux demandes des clients. Ces nœuds remplissent deux fonctions : ils peuvent simultanément recevoir et expédier des produits à travers les systèmes de pipelines. Cependant, cette double fonctionnalité augmente la complexité de l'ordonnancement. Les travaux pertinents prenant en compte l'intégration des nœuds à double utilité sont : (Cafaro & Cerda, 2010; MirHassani et al., 2013; Mostafaei et al. 2015a; Castro, 2017; Liao et al., 2019b; Taherkhani, 2020; Meira et al., 2021).

Cafaro & Cerda (2010) introduisent une formulation MILP en temps continu pour l'ordonnancement des pipelines droits unidirectionnels. Cette formulation considère les nœuds à double utilité, permet des injections de lots simultanées en parallèle et traite les problèmes de séquencement, de dimensionnement des lots, de variations de débit et d'allocation des lots. Plus tard, MirHassani et al. (2013) présente une formulation MILP en temps continu avec pour objectif d'améliorer l'efficacité des modèles précédents en introduisant des contraintes de dépôt à double utilité. Le modèle réduit efficacement la taille du problème par rapport à (Cafaro & Cerda, 2009, 2010) tout en améliorant simultanément la précision en termes de représentation des coûts d'interface. De plus, Cafaro & Cerdá (2012) ont introduit une formulation MILP en temps continu pour l'ordonnancement des réseaux de pipelines structurés en maille avec des nœuds à double utilité, et Liao et al. (2019b) ont développé un modèle MILP en temps continu efficace pour l'ordonnancement des pipelines droits. Le modèle de Liao et al. (2019b) permet de prédéfinir des lots vides, facilitant l'injection de nouveaux produits à des sources intermédiaires sans risquer des niveaux élevés de contamination causés par des lots de produits adjacents incompatibles dans le pipeline, une amélioration par rapport à (Cafaro & Cerdá, 2012).

3.6.7. Gestion de la contamination

Le volume de transmix, résultant du mélange inévitable de produits aux frontières des lots dans les pipelines (interfaces), pose non seulement un défi logistique mais nécessite également un retraitement coûteux. Le degré de contamination des interfaces varie en fonction des types de produits transportés adjacents; certaines séquences créent des quantités relativement plus importantes de transmix et les rendent ainsi inappropriées pour une solution d'ordonnancement.

Les plugs fonctionnent comme une méthode de contrôle de la contamination, séparant différents lots avec une petite quantité d'un produit choisi pour maintenir le contrôle de la qualité et éviter l'incompatibilité chimique. Magatao et al. (2011); Polli et al. (2017); Quinteros et al. (2019) utilisent des plugs comme outil de gestion de la contamination dans l'industrie pétrolière. Le traitement du volume de plugs aux stations terminales entraîne des coûts supplémentaires qui sont généralement considérés comme un élément de la fonction objectif à minimiser. Dans l'industrie minière du phosphate (Bamoumen et al., 2021; Sidki et al., 2022, 2023), les plugs se composent d'un petit volume d'eau. À la station terminale, ces plugs peuvent être recyclés pour être utilisés dans d'autres processus chimiques.

Une autre méthode de contrôle de la contamination utilisée pour éviter la création de niveaux élevés de transmix est d'interdire certaines séquences de produits. Malgré ces considérations, des interfaces se produisent encore, nécessitant un retraitement aux stations terminales. Certaines études intègrent le coût des transmix dans la fonction objectif pour minimiser davantage les volumes de contamination causés par les interfaces. De Souza Filho et al. (2013) incluent le nombre d'interfaces comme un élément de la fonction objectif et il est pondéré de manière appropriée pour ne pas être négligeable par rapport aux autres composants. Plus tard, Castro & Mostafaei (2019) incluent des contraintes qui imposent rigoureusement les séquences de produits interdites et garantissent qu'un seul lot est présent dans les segments de pipeline inactifs, réduisant ainsi la création de transmix aggravée par les arrêts de pipeline. De plus, Yu et al. (2020) introduisent un modèle d'ordonnancement qui intègre la gestion des bacs de stockage de dépôts de transmix. Les transmix entre les produits A et B sont

divisés en parties riches en A, riches en B et bien mélangées. Les parties riches en A et riches en B sont mélangées en produits purs A et B, tandis que la partie bien mélangée nécessite une distillation. Le modèle développé est capable de planifier le recyclage et la gestion du stockage des transmix tout en minimisant leur occurrence.

3.6.8. Gestion des stocks

La gestion des stocks vise à maintenir des niveaux de stocks équilibrés pour répondre à la demande tout en évitant les surplus ou les ruptures de stock, en plus de garantir le contrôle de la qualité des produits en bacs de stockage. Les calculs de niveau de stock des bacs varient selon le niveau de détail. Certaines approches utilisent des horodatages prédéfinis pour simplifier les calculs et éviter la complexité de suivi des mouvements individuels de lots. Par exemple, Dimas et al. (2018) considèrent des calculs des niveaux de stock de lots quotidiens. En revanche, des approches plus détaillées tiennent, quant à elles, compte des changements de niveau de stock dus aux injections de pipeline, aux déchargements et à la consommation des clients, au fur et à mesure qu'ils se produisent (Chen et al., 2019). Cette granularité permet une représentation précise en temps réel des changements de niveau des bacs sur l'horizon d'ordonnancement.

De nombreuses études se sont concentrées sur le problème du transport par pipeline, négligeant souvent les contraintes de capacité des bacs dans les solutions d'ordonnancement. Cette simplification suppose que les bacs ont une capacité suffisante pour absorber les perturbations potentielles du transport par lots (Chen et al., 2017a; Liao et al. 2018a). Dans de nombreux problèmes d'ordonnancement dans l'industrie pétrolière, la présence de niveaux de stocks importants et de grandes capacités de bacs agrégés permet des niveaux d'autonomie relativement élevés, permettant un ordonnancement à court terme sans violer les contraintes de capacité de stockage en conditions réelles si les conditions initiales des bacs sont favorables. Par exemple, Liao et al. (2018a) ne prennent pas en compte les contraintes de capacité des bacs puisque les plans à court terme sont faits à l'avance, en fonction des profils de stockage et des capacités de production. Tout ceci suppose une capacité de stockage suffisante pour stocker les produits pendant toute période de l’horizon, et par

conséquent, une solution d'ordonnancement peut être réalisable dans des scénarios réels.

Dans la littérature, les travaux agrègent souvent les capacités des bacs stockant le même produit dans un dépôt en un seul bac, simplifiant la formulation du problème sans compromettre l'applicabilité des solutions en conditions réelles. Outre les calculs des niveaux des stocks, certaines études intègrent des contraintes de gestion des stocks supplémentaires dans les modèles d'ordonnancement. Cela inclut la définition de niveaux de stock maximum et minimum dans les dépôts pour maintenir un stock de sécurité contre les perturbations potentielles et respecter la capacité agrégée des bacs de stockage (Castro, 2010; Herran et al., 2010; Cafaro & Cerdá, 2012; Chen et al., 2019; Liao et al., 2019b; Yu et al., 2020; Mostafaei et al., 2021).

Dans les industries pétrolière et minière, le contrôle de la qualité est un aspect essentiel de la gestion des stocks. Dans l'industrie pétrolière, le contrôle de la qualité implique une période de décantation pour les nouveaux lots dans les bacs, permettant aux sédiments de se déposer et aux produits de se stabiliser avant que des tests de contrôle et d'approbation des lots ne soient effectués. La durée de la période de décantation peut varier entre les produits. Certaines études ont pris en compte des durées de décantation uniformes pour tous les produits (Relvas et al., 2006; Cafaro & Cerda, 2008b), tandis que d'autres permettent des périodes de décantation variables (Relvas et al., 2007; Dimas et al., 2018). Les contraintes de temps de décantation dans les bacs de stockage sont appliquées en empêchant les opérations de chargement et de déchargement simultanées, en plus de la considération de la disponibilité du stockage et de la date de réception des lots ultérieurs.

En revanche, dans l'industrie minière du phosphate, certains bacs de stockage peuvent stocker différents produits à différentes périodes, nécessitant une modélisation complexe pour éviter la contamination des produits. Un bac doit être vide avant de pouvoir stocker un nouveau produit, et un seul produit est autorisé à être stocké dans un bac à une période donnée. De plus, contrairement à l'industrie pétrolière, l'ordonnancement des slurry pipelines est très dynamique en termes de gestion des stocks. Par exemple, l'autonomie d'un bac de stockage pendant une faible demande dans

Sidki et al. (2022, 2023) est inférieure à 4 heures. De plus, en raison des limitations opérationnelles, les niveaux de stock des bacs doivent toujours être supérieurs à un niveau minimum (différent de zéro). Dans ce cas, si un produit de qualité relativement supérieure doit être stocké dans un bac, une opération de rinçage est effectuée pour mélanger et évacuer le produit précédent avec un volume de lot prédéfini du nouveau produit (Bamoumen et al., 2021).

La gestion des stocks dans les problèmes d'ordonnancement des pipelines multiproduits nécessite des formulations spécifiques pour équilibrer les niveaux de stocks, éviter la contamination et intégrer diverses contraintes opérationnelles. La littérature couvre un large éventail de stratégies, allant de la simplification des calculs de niveau des stocks à l'intégration de la gestion détaillée des stocks et des contraintes de contrôle de la qualité. Les approches qui incluent des calculs détaillés de niveaux de stock et des contraintes de capacité reçoivent de plus en plus d'attention au fil des ans. Néanmoins, les considérations de contrôle de la qualité sont encore limitées dans la littérature étudiée.

3.7. Formulations de Temps et de Volume

La formulation temporelle peut être divisée en temps discret, où l'horizon d'ordonnancement est découpé en intervalles prédéfinis, et en temps continu, qui permet des créneaux horaires variables, définis par une date de début et une durée. En termes de représentation des volumes, l'objectif est de définir comment les quantités de produits sont modélisées dans les pipelines. Cela peut être effectué par une représentation volumétrique discrète, où le pipeline est segmenté en volumes prédéfinis ou bien en packs de produits, ou alors une représentation volumétrique continue, qui peut être davantage catégorisée en formulations centrées sur les lots (batch-centric) ou sur les produits (product-centric).

3.7.1. Formulation du temps

Rejowski & Pinto (2002, 2003) furent parmi les premiers à introduire une représentation en temps discret pour un modèle MILP. Cette approche simplifie le

processus de modélisation en établissant des nœuds temporels connus avant de résoudre le problème d'ordonnancement, ce qui facilite l'intégration de contraintes complexes, telles que les fluctuations des débits (Chen et al., 2017b), la maintenance préventive (Mostafaei et al., 2021b) et la nature non linéaire des prix dépendants du temps, répartis uniformément sur les intervalles temporels connus (Relvas et al., 2013). De plus, cela simplifie les contraintes de gestion des nœuds à double utilité et la gestion des stocks. Cependant, les modèles en temps discret ont souvent des difficultés en termes de scalabilité et de performance computationnelle par rapport aux modèles en temps continu. Toutefois, il convient de noter que la performance des formulations en temps discret peut varier en fonction des caractéristiques spécifiques du problème d'ordonnancement. Par exemple, Castro (2010) a constaté que, dans certaines conditions, les représentations en temps discret peuvent surpasser les représentations en temps continu pour les problèmes d'ordonnancement de pipelines en MILP. En particulier, lorsque les solutions réalisables sont difficiles à obtenir et qu'il n'y a pas de réduction observée du gap d'intégrité avec les modèles en temps continu. La performance des formulations en temps discret par rapport aux formulations en temps continu n'est pas cohérente dans tous les scénarios et doit être évaluée au cas par cas.

Cafaro & Cerdá (2004) furent parmi les premiers à adopter une représentation en temps continu pour un modèle MILP. Plus tard, Cafaro & Cerda (2008a) ont établi un modèle en temps continu considérant les dates d'échéance de livraison des produits. De plus, Rejowski & Pinto (2008) ont introduit une formulation continue en Programmation Non Linéaire Mixte en Nombres Entiers (MINLP) permettant des débits variables. En comparant le modèle en temps continu avec un modèle en temps discret précédemment développé proposé par Rejowski & Pinto (2004), les auteurs démontrent que le modèle MINLP peut conduire à une amélioration de la qualité des solutions et des performances computationnelles, en particulier lorsque le nombre d'intervalles temporels représentant les opérations de transfert est bien défini.

La représentation hybride du temps combine les représentations en temps discret et continu en fixant certains événements à des nœuds temporels ou intervalles prédéfinis, créant ainsi des segments temporels discrets. Cela simplifie la représentation des variables non linéaires dépendantes du temps et facilite les calculs

des niveaux de stock. Relvas et al. (2009) intègrent une formulation en temps continu avec des calculs des niveaux des bacs de stockage journaliers. Xu et al. (2021) définissent des prix de l'électricité dépendants du temps de manière variable, uniformément répartis sur des intervalles de temps prédéfinis. De plus, le modèle utilise une représentation basée sur l'offre selon laquelle les opérations d'injection sont prédéfinies et introduit des points temporels variables flottants pour ajuster les débits de livraison.

3.7.2. Formulation du volume

Dans une représentation volumétrique discrète, les pipelines sont segmentés en lots discrets, chacun contenant un volume spécifique d'un produit unique. Le mouvement des produits est suivi en mettant à jour le contenu de ces segments au fil du temps. Pendant chaque intervalle de temps, un produit se déplace soit d'un segment à l'autre, soit déchargé dans un dépôt, soit reste dans le même segment en cas d'arrêt. Rejowski & Pinto (2008) adoptent une représentation en temps continu et en volume discret pour permettre des débits variables. Herran et al. (2010) démontrent que la représentation volumétrique discrète facilite la représentation linéaire des relations non linéaires entre les variables d'une formulation continue. Cela simplifie également la gestion des volumes d'interface entre les lots adjacents contenant différents produits.

La représentation volumétrique continue peut être divisée en modèles centrés sur les lots (batch-centric) et centrés sur les produits (product-centric). Dans les modèles centrés sur les lots (Cafaro & Cerdá, 2004; Relvas et al., 2006; Castro & Mostafaei, 2019; Chen et al., 2019; Liao et al., 2019b, 2019d), les produits à la station d'entrée sont considérés comme des lots lorsqu'ils sont injectés dans le pipeline, puis tout au long de leur transport jusqu'aux nœuds de livraison. Les lots sont généralement numérotés séquentiellement en fonction de la direction du flux, la séquence indiquant l'ordre dans lequel ils sont injectés ou bien déchargés. Les approches centrées sur les lots nécessitent la prédéfinition de l'état initial des pipelines (anciens lots présents dans les pipelines au début de l'horizon d'ordonnancement) et du nombre maximal de nouveaux lots à planifier. Cette exigence est cruciale pour la formulation du modèle mais introduit également une couche de complexité, en particulier pour les pipelines

avec des topologies complexes. Cette exigence devient encore plus compliquée dans le cas des systèmes de pipelines permettant des débits réversibles, car définir le nombre d'inversions de flux (qui peut être une variable), en plus du nombre de lots à planifier, représente une difficulté supplémentaire dans la modélisation. Une autre limitation de certains modèles centrés sur les lots est le placement de lots vides entre deux produits incompatibles, ce qui peut entraîner des solutions inexactes provoquant une contamination élevée. Ce problème peut être facilement résolu en utilisant des contraintes supplémentaires pour réorganiser les lots vides à la fin de la séquence d'injection.

En revanche, l'approche centrée sur les produits se concentre quant à elle sur le suivi du mouvement des produits individuels à travers les pipelines (Castro, 2017; Castro & Mostafaei, 2017; Magatao et al., 2011). Ce type de modèle ne nécessite pas de prédéfinir le nombre de lots ou l'état initial du pipeline. Il est conçu pour gérer l'ordonnancement de tous types de systèmes de pipelines, quelle que soit leur topologie. Cette flexibilité de modélisation présente quelques inconvénients, car les modèles centrés sur les produits nécessitent généralement plus d'intervalles de temps pour la définition d'une solution d'ordonnancement, ce qui entraîne des variables et des contraintes supplémentaires, ainsi qu'une augmentation du temps de calcul. La représentation volumétrique discrète peut être considérée comme un type spécial de représentation centrée sur les produits où tous les intervalles de temps sont fixes.

3.8. Stratégies de solution

3.8.1. Modèles mathématiques

Une des approches classiques d'optimisation consiste à utiliser des modèles de MILP ou MINLP pour la résolution des problèmes d'ordonnancement de pipelines multiproduits. Les modèles MINLP étendent les modèles MILP en intégrant des contraintes non linéaires. Rejowski & Pinto (2008) ont développé un modèle MINLP en temps continu qui intègre le coût de pompage dépendant du rendement dans les stations de pompage. Liang et al. (2012) se concentrent sur la minimisation de l'écart

total des fenêtres de temps d'opération de livraison par rapport aux fenêtres de temps d'échéance à chaque station. La non-linéarité des contraintes dans le modèle d'ordonnancement émerge de la dépendance de la faisabilité de la solution de livraison à la capacité du pipeline et aux configurations de pompes à un moment donné. Cafaro et al. (2015a) introduisent une formulation MINLP traitant de la friction, définie comme une fonction du coût de pompage dépendant du débit. De plus, Asl et al. (2022) considèrent des termes non linéaires associés aux calculs de volume des lots, qui sont des produits non linéaires du temps d'injection et du débit variable.

L'avantage principal des modèles mathématiques réside dans leur capacité à fournir des solutions optimales en utilisant des solveurs commerciaux, tels que CPLEX ou Gurobi. Ces outils incluent diverses techniques d'optimisation telles que l'algorithme du simplexe, les algorithmes de branchement, la méthode des plans de coupe (cutting planes), ainsi que plusieurs heuristiques. Les modèles mathématiques demeurent un pilier dans l'ordonnancement des pipelines multiproduits, bien que les temps de calcul puissent croître de manière exponentielle avec la taille du problème, les rendant moins adaptés aux instances de grande taille.

3.8.2. Programmation par contraintes

La Programmation par Contraintes (CP) développe les problèmes comme un ensemble de règles qui doivent être satisfaites, conduisant souvent à l'identification rapide des solutions d'ordonnancement faisables. Felizari et al. (2009) développent un modèle CP pour le séquencement des lots dans un réseau de pipelines à structure en maillage, avec l'objectif de minimiser les violations des fenêtres de temps. Tamura Lopes et al. (2010) introduisent un modèle hybride combinant des approches heuristiques avec CP pour la planification et l'ordonnancement d'un réseau de pipelines multiproduits complexe, démontrant l'utilité de la CP dans la génération de solutions viables. De plus, Magatao et al. (2011) combinent la Programmation Logique par Contraintes (CLP) et la Programmation Linéaire Mixte en Nombres Entiers (MILP) dans un modèle pour un problème d'ordonnancement de pipeline à flux réversible à source unique et destination unique, permettant une amélioration des résultats par rapport à l'utilisation seule de MILP ou de CLP.

3.8.3. Algorithmes heuristiques

Les algorithmes heuristiques sont des approches basées sur des règles conçues pour trouver des solutions de bonne qualité dans un délai raisonnable. Ils sont particulièrement utiles dans les scénarios où les méthodes d'optimisation exactes peuvent s'avérer intensives en termes de calcul. Ces algorithmes sont souvent personnalisés pour les caractéristiques et les contraintes spécifiques d'un problème d'ordonnancement, en utilisant des règles de décision simplifiées qui guident la recherche vers des solutions satisfaisantes. Ces algorithmes heuristiques incluent des approches classiques telles que les algorithmes gloutons (Tamura Lopes et al., 2010), les algorithmes de recherche depth-first (Magatao et al., 2011) et les algorithmes de priorité (Liao et al., 2018c). D'autres approches heuristiques incluent (Relvas et al., 2009; De Souza Filho et al., 2013; MirHassani & BeheshtiAsl, 2013; Magatão et al., 2015; Chen et al., 2017a; Polli et al., 2017; Bueno et al., 2020; Yan et al., 2021).

3.8.4. Algorithmes méta-heuristiques

Les algorithmes méta-heuristiques visent à naviguer vers des solutions de haute qualité sans se laisser piéger par des optima locaux. Chen et al. (2017a) proposent une méta-heuristique de recuit simulé (SA) pour un problème d'ordonnancement de pipeline linéaire. L'algorithme SA est employé pour affiner itérativement une solution initiale en sélectionnant une station intermédiaire, en choisissant un lot et en ajustant les opérations pour minimiser les variations de débit des pompes. De plus, Tsunoda Meira et al. (2020) développent une approche math-heuristique combinant SA avec un modèle MILP pour l'ordonnancement d'un système de pipeline multiproduits à source unique. Haoran et al. (2018) introduisent une approche d'auto-apprentissage qui combine l'analyse de clustering flou (fuzzy clustering) avec l'optimisation par colonie de fourmis (ACO) pour l'ordonnancement des pipelines linéaires multiproduits. En utilisant un ensemble de données de problèmes et de solutions, le clustering flou catégorise les scénarios d'ordonnancement pour faciliter l'apprentissage des règles d'ordonnancement. Ensuite, l'ACO applique les règles apprises pour guider la recherche locale.

3.8.5. Modèles de simulation

Les modèles de simulation répliquent les dynamiques complexes des systèmes de pipelines réels, permettant l'exploration de divers scénarios d'ordonnancement et de leurs résultats. Gleizes et al. (2012) introduisent un modèle de simulation basé sur des événements pour le transport de carburant dans un réseau de pipelines en maillage multi-sources complexe, modélisant le pipeline comme un système de file d'attente multi-serveurs avec des tâches synchronisées et des règles de priorité pour la répartition. Strachotova & Dyntar (2021) utilisent le logiciel WITNESS pour simuler un problème d'ordonnancement de pipeline linéaire. Le modèle de simulation évite les représentations traditionnelles d'objets physiques ou discrets, au profit d'éléments logiques appelés "Variables". Cette approche facilite la modélisation des flux bidirectionnels dans les pipelines. De plus, Csontos et al. (2022a) présentent un modèle de simulation à événements discrets pour le transport de carburant dans un réseau en maillage pour valider les plans d'ordonnancement à moyen terme, identifiant puis résolvant les conflits d'ordonnancement potentiels. Plus tard, Csontos et al. (2022b) ont amélioré le modèle précédent en intégrant des simulations rigoureuses et décalées dans le temps pour permettre le reroutage, le fractionnement et l'inversion du sens de flux des produits dans les pipelines.

3.8.6. Approches basées sur les données

Les approches basées sur les données utilisent les données historiques pour apprendre des solutions passées, une approche bénéfique pour les problèmes avec une offre et une demande cohérente et des états initiaux de pipelines stables. Cependant, la recherche sur les méthodes basées sur les données pour l'ordonnancement de pipelines multiproduits est encore émergente, avec des applications limitées. Liao et al. (2018c) développent une méthode heuristique basée sur les données pour l'ordonnancement des réseaux de pipelines multiproduits ramifiés en utilisant un modèle MINLP ainsi qu'un algorithme de priorité. Plus tard, Liao et al. (2019a) proposent une approche basée sur les données pour l'ordonnancement de pipelines linéaires à source unique, en utilisant un réseau neuronal pour générer rapidement un ensemble de données d'entraînement,

couplé avec des cas réels pour améliorer les capacités d'auto-apprentissage du réseau. L'objectif est d'approcher les optima globaux pour les problèmes d'ordonnancement complexes. De plus, Xin et al. (2019) introduisent un modèle MILP multi-objectif, basé sur les données pour l'ordonnancement des pompes des pipelines. L'approche comprend un modèle d'évaluation basé sur un réseau neuronal pour déterminer l'efficacité des régimes de fonctionnement des pompes, affinant la sélection des solutions d'ordonnancement.

3.8.7. Approches de prétraitement et de décomposition

Le prétraitement fait référence au traitement initial des données et des contraintes d'ordonnancement pour simplifier le processus de résolution, souvent en réduisant la complexité du problème ou en transformant le problème en une forme plus gérable (Xu et al., 2021; Yu et al., 2020). La décomposition, quant à elle, consiste à décomposer un problème d'ordonnancement complexe en sous-problèmes plus petits et plus gérables, qui peuvent être résolus de manière indépendante ou coordonnée (Boschetto et al., 2010; Magatão et al., 2012; Polli et al., 2017; Meira et al., 2018; Yan et al., 2021). Les approches de décomposition ont été largement utilisées dans la littérature pour aborder les défis computationnels des instances de problème plus grandes. Ces méthodes se sont avérées efficaces pour réduire le temps de calcul et la complexité des problèmes d'ordonnancement.

3.9. Objectifs d'ordonnancement

La fonction objectif joue un rôle crucial dans l'orientation du processus de recherche des solutions vers des résultats souhaitables. Elle peut être catégorisée en objectifs opérationnels et économiques. Les objectifs opérationnels se concentrent sur l'efficacité des opérations de pipeline, tels que la minimisation de la durée totale de l'horizon d'ordonnancement (makespan) ou la maximisation de l'utilisation de la capacité du pipeline. Les objectifs économiques, quant à eux, sont centrés sur la réduction des coûts et la rentabilité. La littérature explore fréquemment des approches d'optimisation multi-objectifs, dans lesquelles plusieurs objectifs sont soit combinés en

une seule fonction par pondération, soit abordés séparément (Xin et al., 2019), permettant aux décideurs d'équilibrer les compromis entre les objectifs, ou de minimiser un coût opérationnel total basé sur différents critères. Les critères d'optimisation les plus utilisés dans les problèmes d'ordonnancement des pipelines multiproduits, par ordre de prévalence, sont :

1. Minimisation du coût de pompage (MirHassani et al., 2011; Cafaro & Cerdá, 2012)
2. Minimisation du volume/coût des interfaces (Herran et al., 2010; Mostafaei et al., 2016)
3. Minimisation des ruptures de produit (Taherkhani et al., 2017; Haoran et al., 2018)
4. Minimisation du makespan (Castro & Mostafaei, 2019; Chen et al., 2019)
5. Minimisation du coût de stockage (Mostafaei et al., 2015a; Asl et al., 2022)
6. Minimisation du coût total de fonctionnement du pipeline (Cafaro et al., 2011; Abdellaoui et al., 2021)
7. Minimisation des marches/arrêts des pompes (Xin et al., 2019; Taherkhani, 2020)
8. Minimisation de la sous-utilisation de la capacité du pipeline (Dimas et al., 2018; Xin et al., 2019)
9. Minimisation des variations de débit de pompes (Chen et al., 2017a; Meira et al., 2018)
10. Minimisation du volume/temps de pompage total des produits transportés par les pipelines (Relvas et al., 2006; Castro, 2010)
11. Minimisation du temps/coût d'inactivité des pipelines (Cafaro et al., 2010; Magatao et al., 2011)
12. Minimisation des violations des limites de stockage (Magatão et al., 2012; Quinteros et al., 2019)
13. Minimisation du coût de redémarrage dans les segments inactifs (Mostafaei & Hadigheh, 2014; Mostafaei et al., 2016)
14. Minimisation de l'écart entre le volume livré et le volume demandé (Relvas et al., 2007; Liao et al., 2018a)
15. Minimisation des violations des fenêtres de temps (Boschetto et al., 2010; Liang et al., 2012)

4. DISCUSSION

Depuis l'an 2000, un intérêt croissant pour les problèmes d'ordonnancement des pipelines multiproduits émerge. Ce domaine de recherche est dominé par l'utilisation de modèles MILP, se concentrant sur l'ordonnancement détaillé des pipelines linéaires à l'aide d'une formulation en temps continu. Les topologies de pipelines plus complexes, telles que les structures arborescentes et en maillage, attirent de plus en plus l'attention des chercheurs, quoique dans une moindre mesure, et des solutions plus efficaces sur le plan computationnel ont été développées. En outre, il y a une tendance vers des approches plus holistiques qui cherchent à construire des modèles pour trouver des solutions d'ordonnancement depuis le début, en utilisant des approches de décomposition ou des modèles monolithiques. La revue systématique de la littérature a identifié plusieurs domaines pour des recherches futures, qui sont présentés ci-dessous :

La littérature actuelle aborde principalement l'ordonnancement des opérations de transport dans les pipelines, en se concentrant sur le séquençage des lots et la détermination des dates de leur injection et de réception dans les dépôts. Cependant, d'autres éléments cruciaux de la chaîne de valeur, tels que l'ordonnancement de la production et la gestion des stocks, sont souvent simplifiés ou négligés. Les contraintes de production peuvent fortement affecter l'applicabilité d'une solution d'ordonnancement. Supposer un débit de production constant de tous les produits tout au long de l'horizon d'ordonnancement ne reflète pas fidèlement les scénarios réels, surtout sur des horizons d'ordonnancement à moyen et à long terme. Une représentation plus précise de la production est nécessaire pour refléter les réalités opérationnelles. En outre, la gestion détaillée des stocks devrait recevoir plus d'attention, en particulier pour les topologies de pipelines plus complexes. De plus, la demande des clients est souvent simplifiée, représentée soit comme une quantité totale à satisfaire à la fin de l'horizon d'ordonnancement, soit distribuée uniformément sur l'horizon d'ordonnancement. Cette simplification excessive peut rendre les solutions d'ordonnancement irréalisables, vu que les prévisions de la demande varient

généralement en fonction de multiples facteurs qui peuvent entraîner des risques d'erreurs dans les estimations.

Les opérations d'ordonnancement réelles s'écartent souvent des solutions d'ordonnancement proposées par un modèle, soulignant la nécessité d'approches dynamiques pour ces problèmes d'ordonnancement. L'ordonnancement réactif, qui ajuste les solutions d'ordonnancement en réponse à de nouvelles informations, offre un moyen de répondre aux perturbations. Cependant, la littérature sur l'ordonnancement réactif est très limitée. Bien que de nombreuses études intègrent des horizons glissants, qui mettent à jour la solution d'ordonnancement après des périodes prédéfinies, cette approche omet la réactivité événementielle de l'ordonnancement réactif. Dans les problèmes avec des niveaux élevés d'incertitude, il y a un besoin évident de solutions robustes basées sur des représentations d'environnements incertains.

Les méthodes basées sur les données, telles que les modèles d'apprentissage profond et l'apprentissage par renforcement, peuvent contribuer à la conception des nouvelles approches pour résoudre efficacement les problèmes d'ordonnancement des pipelines multiproduits, en particulier dans les systèmes où les données s'accumulent continuellement et sont accessibles en temps réel. Ces méthodes peuvent utiliser de vastes quantités de données opérationnelles pour prédire les comportements du système et prendre des décisions d'ordonnancement basées sur des modèles appris. L'apprentissage profond peut découvrir des schémas complexes dans les données historiques, offrant des prévisions plus précises de la demande, des débits et des goulots d'étranglement potentiels. L'apprentissage par renforcement, quant à lui, s'adapte aux conditions changeantes en apprenant des politiques optimales par essai et erreur, améliorant continuellement ses décisions en fonction des retours de l'environnement. De telles approches permettent d'améliorer significativement la flexibilité de l'ordonnancement par rapport aux modèles traditionnels. Malgré leur potentiel, les approches basées sur les données restent peu utilisées dans la littérature, avec une absence de travaux traitant de l'apprentissage par renforcement. Cette lacune suggère une opportunité significative pour les recherches futures d'explorer comment ces techniques computationnelles avancées peuvent être appliquées aux problèmes complexes d'ordonnancement des pipelines multiproduits.

5. CONCLUSION

Ce chapitre fournit une évaluation approfondie de la littérature sur l'ordonnancement des pipelines multiproduits, en menant une analyse bibliométrique et une revue systématique de la littérature pertinente. Grâce à l'analyse bibliométrique, cette étude présente un aperçu de la littérature, illustrant le développement du domaine, catégorisant les publications, identifiant les principaux domaines thématiques, présentant les principaux contributeurs et les sources les plus pertinentes, et cartographiant la distribution mondiale de la recherche. En complément de l'analyse bibliométrique, un cadre d'analyse structuré a été développé pour la revue systématique de la littérature, utilisant divers critères de classification pour explorer l'état actuel de la littérature et les pistes de recherche potentielles pour l'avenir.

Chapitre 3 : Une approche MILP monolithique centrée sur les lots pour un problème réel d'ordonnancement intégré de la production et de la distribution de phosphate

Ce chapitre reproduit et étend les résultats et les conclusions des articles publiés suivants :

Mouad SIDKI, Tchernev NIKOLAY, Pierre FÉNIÈS, Libo REN, Selwa EL FIRDOUSSI, (2025). **A monolithic batch-centric MILP approach for a real-world integrated production and pipeline distribution scheduling problem**. Computers & Industrial Engineering, 203, 111028.

https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.111028

Mouad SIDKI, Tchernev NIKOLAY, Pierre FÉNIÈS, Libo REN, Selwa EL FIRDOUSSI, (2023). **A MILP approach for detailed operational scheduling of a supply chain in the phosphate industry**. CIGI QUALITA MOSIM 2023.
https://doi.org/10.60662/MRSX-C330

1. INTRODUCTION

Ce chapitre aborde un problème complexe d'ordonnancement réel de la chaîne de valeur du phosphate intégrée sur le site minier de Khouribga du Groupe OCP. Le site minier de Khouribga est responsable de 70 % de la production de roche phosphatée du groupe. La chaîne de valeur intégrée, présentée dans la Figure 3.1, s'étend de la production de minerai de phosphate à la livraison aux clients, en englobant les laveries, un réseau de pipeline multiproduit de longue distance, des bacs de stockage, et divers clients, tant locaux qu'internationaux. L'ordonnancement efficace du réseau de pipelines est un défi primordial, qui influence directement les coûts opérationnels,

l'utilisation des ressources et la fiabilité globale de la chaîne de valeur. Malgré l'importance de l'ordonnancement des pipelines, il est notable que traditionnellement, la plupart des tâches liées à la coordination et à la planification des réseaux de pipelines, surtout ceux aussi complexes que celui de l'Axe de Khouribga, sont souvent effectuées de façon manuelle. L'ordonnancement manuel entraîne de nombreux problèmes, notamment des erreurs humaines, une adaptabilité limitée aux changements opérationnels dynamiques et une probabilité accrue de mauvaises décisions.

La complexité opérationnelle de la chaîne de valeur intégrée du phosphate découle de l'ordonnancement détaillé des opérations de production et de distribution multiproduits, qui prend en compte la variabilité de la demande de minerai de phosphate, les différents débits de production aux laveries, les différents débits de transport des pipelines et l'allocation des produits dans plusieurs bacs de stockage. Cela amplifie la difficulté d'ordonnancer manuellement les laveries et le réseau de pipelines. De plus, l'intégration de multiples contraintes spécifiques à l'industrie, telles que les limites de capacité de stockage, les limites des tailles de lots et les exigences de livraison continue de produits, complique davantage le processus de prise de décision.

L'utilisation d'un réseau de pipeline multiproduits au sein de la chaîne de valeur du phosphate pour le transport des minerais de phosphate sur de longues distances, assure une livraison continue et efficace pour répondre à la demande des clients. Contrairement aux limitations inhérentes aux modes de transport classiques, tels que les camions et les chemins de fer, les pipelines offrent un moyen de transport continu, fiable, durable sur le plan environnemental et économique pour transporter des produits sur de grandes distances (Rejowski & Pinto, 2003; Qiu et al., 2019). Dans le domaine de l'industrie du phosphate, le minerai de phosphate est broyé puis lavé dans des laveries, créant une pulpe qui peut être transportée à travers le réseau de pipelines. La pulpe de phosphate est un mélange d'eau et de particules hydrophobes de minerai de phosphate en suspension, utilisée en continu par les clients locaux pour le traitement chimique, afin de produire de l'acide phosphorique, qui est ensuite transformé en une large gamme d'engrais et en d'autres produits à base de phosphate. De plus, la pulpe de phosphate peut être directement filtrée pour réduire les niveaux d'humidité, séchée, stockée, puis exportée vers des clients internationaux par voie maritime.

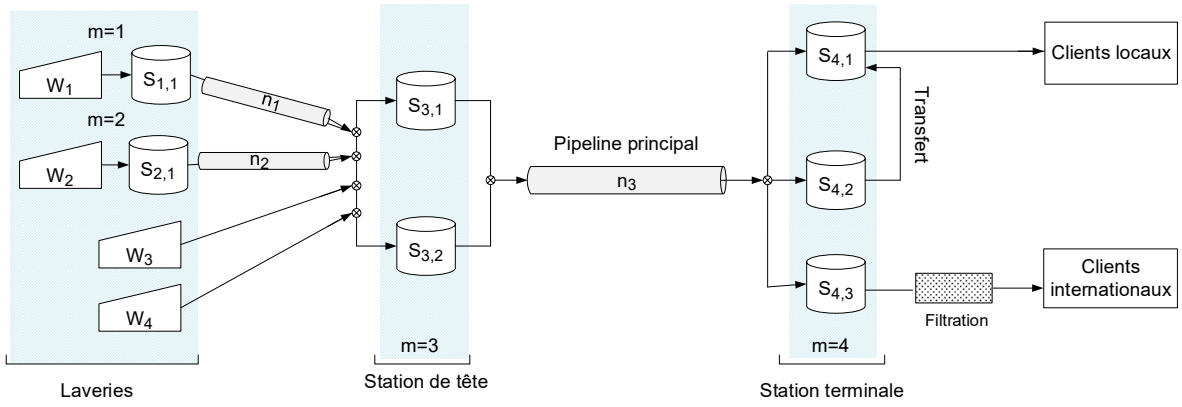


Figure 3.1. Vue schématique de la chaîne de valeur intégrée de la production et de la distribution

Comme illustré dans la Figure 3.1, le problème d'ordonnancement de la chaîne de valeur intégrée étudié se concentre sur la production et le transport de diverses qualités de minerai de phosphate, désignées comme produits, à travers les laveries, les pipelines secondaires et le pipeline principal, en plus de l'ordonnancement des différentes opérations à la station terminale, telles que les opérations de transfert et de filtration. Le minerai de phosphate, extrait de diverses mines avec des couches géologiques distinctes et des concentrations variables de BPL (Bone Phosphate of Lime), subit un processus industriel dans les laveries. Ce processus implique l'extraction, les opérations d'enrichissement et les traitements physiques tels que la séparation, la classification, le lavage et la calcination. Le minerai de phosphate résultant, désormais sous forme de pulpe hydrophobe, subit des ajustements de taille et de concentration pour le transport par pipeline. La pulpe de phosphate est transportée des laveries à la station de tête via des pipelines secondaires. Le pipeline principal, s'étendant sur 187 km, relie le site minier de Khouribga à la station terminale du complexe industriel de Jorf Lasfar. Sur ce site, les clients locaux consomment en continu un produit dominant (dénommé P_1) pour le traitement chimique, ce qui représente plus de 90 % de la demande annuelle totale. De plus, la demande des clients internationaux est garantie via le port de Jorf Lasfar.

En outre, des bacs de stockage multiproduits sont employés pour le stockage des produits planifiés. Contrairement aux bacs agrégés dans l'industrie pétrolière, où l'autonomie des bacs peut assurer la satisfaction de la demande pendant des jours voire

des semaines, les bacs traités dans cette étude ont une autonomie nettement plus faible. Par exemple, $S_{4,1}$ peut atteindre une autonomie aussi faible que 2,5 heures pendant les pics de demande. De plus, ces bacs peuvent suivre l'une des politiques de stockage suivantes : un bac peut être soit dédié à un seul produit, comme c'est le cas dans l'industrie pétrolière, soit stocker différents produits à différentes périodes. Des contraintes supplémentaires sont nécessaires pour gérer l'allocation et le contrôle de la qualité de ces bacs de stockage. De plus, en raison de la forte demande pour le produit local P_1, deux bacs sont dédiés à son stockage : $S_{4,1}$ et $S_{4,2}$. Les clients locaux sont directement connectés à $S_{4,1}$ via un pipeline secondaire, et $S_{4,2}$ est relié à $S_{4,1}$ par un pipeline de transfert.

Un modèle MILP est proposé pour aborder le problème d'ordonnancement intégré de la chaîne de valeur du phosphate considéré, qui inclut un sous-problème d'ordonnancement de réseau de pipeline multiproduits unidirectionnel, un sous-problème d'ordonnancement de production des laveries, et un sous-problème de gestion des bacs multiproduits. L'horizon temporel d'ordonnancement est divisé en un nombre prédéfini d'intervalles de temps, avec une seule décision d'ordonnancement autorisée pendant chaque intervalle. Les durées de ces intervalles sont variables et déterminées par le modèle MILP. L'objectif est de maximiser l'utilisation des pipelines transportant les produits tout en satisfaisant la demande des clients et en prenant des décisions d'ordonnancement pour toutes les unités de la chaîne de valeur intégrée. En raison de la nature opérationnelle du problème étudié et de son état initial hautement variable, un horizon d'ordonnancement H_1 est considéré pour les opérations d'injection du pipeline principal. De plus, une durée de vidange complète du pipeline principal de 26,5 heures H_2 est quant à elle considérée pour la décharge totale des lots occupant le pipeline principal à la fin de l'horizon d'injection d'ordonnancement H_1. Cette durée supplémentaire est nécessaire afin de pouvoir évaluer l'impact des derniers lots ordonnancés en aval à la station terminale, surtout au regard de la durée de transport relativement longue du pipeline principal (26,5 heures).

Les paramètres d'entrée suivants sont employés :

- Le début et la fin de l'horizon d'ordonnancement d'injection des pipelines H_1.

- La fin de l'horizon de décharge du pipeline principal H_2.
- Le nombre d'intervalles de temps dans l'horizon d'ordonnancement.
- Le nombre de produits.
- Les débits des pipelines, des laveries et de l'unité de filtration.
- Le nombre maximal de nouveaux lots pouvant être planifiés dans chaque pipeline au cours de l'horizon d'ordonnancement (ce nombre est déterminé sur la base de données historiques en tenant compte des scénarios les plus dynamiques).
- Les limites supérieures et inférieures des tailles de lots dans les pipelines et les laveries.
- La durée de configuration des laveries lors d'un changement de produit et la durée minimale d'arrêt pour les pipelines secondaires.
- Le débit de consommation du produit local P_1 et la demande globale pour les autres produits.
- Les séquences interdites entre les produits transportés de manière adjacente dans les pipelines.
- Les limites supérieures et inférieures des volumes des bacs.
- L'ensemble des produits autorisés à être planifiés dans chaque laverie, pipeline secondaire et bac.
- L'état initial des pipelines avant le début de l'horizon d'ordonnancement, y compris la séquence et les volumes des anciens lots.
- Les niveaux de stock initiaux et les produits présents dans les bacs.

Les hypothèses suivantes sont prises en compte :

- Les pipelines sont unidirectionnels et le flux inversé est interdit.
- Les pipelines sont toujours pleins et les produits qu'ils contiennent sont incompressibles.
- Le débit des pipelines est uniforme.
- À un intervalle de temps donné, seul un produit peut être planifié dans un pipeline (injecté ou déchargé), dans une laverie, dans un bac et dans l'unité de filtration.

- L'arrêt du pipeline principal n'est pas autorisé en raison de son coût élevé. En revanche, les arrêts des pipelines secondaires sont autorisés pour réduire la quantité totale d'eau utilisée.
- Les bacs de stockage intermédiaires ne sont pas pris en compte dans les laveries si le débit de pompage du pipeline secondaire associé est égal à celui de la production. Dans de tels cas, pour simplifier, seul l'ordonnancement de la laverie est considéré, puisque l'ordonnancement du pipeline secondaire devient redondant. Cela s'applique particulièrement aux cas avec des durées de transport courtes, comme c'est le cas pour W_3 et W_4 (moins de 15 min).
- Le suivi des lots dans le pipeline de transfert n'est pas pris en compte, vu qu'il est conçu pour transporter un seul produit sur une distance négligeable.
- Les bacs $S_{3,1}$, $S_{4,1}$ et $S_{4,2}$ sont dédiés au stockage du produit P_1, tandis que d'autres bacs peuvent stocker différents produits à différents intervalles de temps.

L'accent de cette étude est mis sur la résolution d'un problème d'ordonnancement de pipeline unidirectionnel multiproduits, dans un réseau de pipeline en structure maillée, couplé à un problème d'ordonnancement de production dans plusieurs laveries et à un problème de gestion des stocks impliquant des bacs multiproduits capables de stocker plusieurs produits dans le même bac à différentes périodes. L'approche proposée est un modèle monolithique de programmation linéaire en nombres entiers mixtes centré sur les lots, capable de trouver des solutions optimales et quasi-optimales pour les problèmes d'ordonnancement réels présentés dans l'industrie du phosphate. À notre connaissance, les contributions de cette recherche sont les suivantes :

- Notre travail est parmi les premiers à intégrer l'ordonnancement détaillé de la production et de la distribution par pipeline au sein d'une chaîne de valeur intégrée. Dans la littérature, dominée par des études dans l'industrie pétrolière, les opérations des raffineries sont souvent simplifiées comme ayant un débit de production continu pour tous les produits.
- Notre travail est le premier à proposer une solution pour la gestion des bacs multiproduits dans le cadre d'une chaîne de valeur intégrée du phosphate, permettant le stockage de différents produits dans le même bac.

- La formulation du modèle MILP permet une décharge totale du pipeline principal à la fin de l'horizon d'ordonnancement, permettant une évaluation de l'impact des décisions d'ordonnancement des injections du pipeline principal sur la demande et les niveaux des bacs de stockage à la station terminale.
- Les instances utilisées proviennent de données réelles du groupe OCP.

La suite du chapitre est organisée comme suit : la section 2 présente en détail le modèle MILP proposé. La section 3 décrit les expériences menées pour évaluer le modèle proposé. Le chapitre se conclut par la section 4.

2. MODELE MATHEMATIQUE

2.1. Nomenclature

Ensembles des indices	
$n \in N = \{1, \dots, NM\}$	ensemble des pipelines. NM est le nombre de pipelines.
$i \in I_n = \{1, \dots, IM_n\}$	ensemble des lots transportés par le pipeline n. $IM_n = IOM_n + INM_n$, où IOM_n est le nombre de lots anciens contenus dans le pipeline au début de l'horizon d'ordonnancement et INM_n est le nombre de nouveaux lots à planifier après le début de l'horizon d'ordonnancement.
$IO_n = \{1, \dots, IOM_n\}$	ensemble des lots anciens contenus dans le pipeline n au début de l'horizon d'ordonnancement, numérotés du plus éloigné au plus proche de l'origine du pipeline n.
$IN_n = \{IOM_n + 1, \dots, IM_n\}$	ensemble des nouveaux lots à injecter dans le pipeline n pendant l'horizon d'ordonnancement.
$j \in J = \{1,2\}$	ensemble des extrémités du pipeline n. $j = 1$ représente l'origine du pipeline et $j = 2$ représente sa destination.
$k \in K = \{1, \dots, KM\}$	ensemble des nœuds de temps. KM est le nombre de nœuds de temps pour l'ordonnancement des opérations d'injection de tous les pipelines.
$m \in M = \{1, \dots, MM\}$	ensemble des stations. MM indique le nombre total de stations contenant des bacs de stockage.
$p \in P = \{1, \dots, PM\}$	ensemble des produits. PM indique le nombre total de produits.
$cp \in CP = \{1, \dots, CPM\}$	ensemble des produits définis par un débit de consommation continue.

$dp \in DP = P \backslash CP$	ensemble des produits définis par une quantité totale à satisfaire à la fin de l'horizon d'ordonnancement.
$s \in S_m = \{1, \dots, SM_m\}$	ensemble des bacs à chaque station m.
$q \in WS = \{1, \dots, \mathrm{W}M\}$	ensemble des laveries. WM indique le nombre total de laveries.
$a \in APU_u$	ensemble des décisions autorisées dans la laverie $u \in WS$ ou dans le pipeline $u \in \{\mathrm{W}M+1, \dots, \mathrm{W}M+NM\}$. APU_u contient les produits pouvant être traités par l'unité u et la décision $a = PM + 1$ se réfère à une décision d'arrêt pour une laverie et à l'ordonnancement de l'eau pour un pipeline.
$b \in APS_{m,s}$	ensemble des produits autorisés à être stockés dans le bac s de la station m.

Paramètres continus

F_n	volume du pipeline n (m^3).
QIA_n	débit du pipeline n (m^3/h).
FFU	débit maximal de l'unité de filtration (m^3/h).
$QR_{q,p}$	débit de traitement du produit p dans la laverie q (m^3/h).
TL	durée de l'horizon d'ordonnancement pour les opérations d'injection des pipelines (h).
$VBPA_{n,a}$,$VBPI_{n,a}$	tailles maximales et minimales d'un lot de produit $a \in P$ ou d'un lot d'eau ($a = PM + 1$) injecté dans le pipeline n (m^3).
$VMTA_{m,s}$,$VMTI_{m,s}$	niveaux de stock maximaux et minimaux autorisés dans le bac s de la station m (m^3).
$VMTO_{m,s}$	stock initial dans le bac s de la station m (m^3).
$VMPD_p$	pour $p \in CP$, $VMPD_p$ est le débit de consommation du produit p en m^3/h. Pour $p \in DP$, $VMPD_p$ est la quantité totale de demande du produit p en m^3.
TF	débit de l'opération de transfert (m^3/h).
$WO_{n,i}$	volume initial du lot ancien i dans le pipeline n (m^3).
$VBWS_{q,p}$	taille minimale du lot de produit p autorisée dans la laverie q (m^3).
WST_q	durée de configuration des laveries q (h).
τ	longueur minimale d'un intervalle de temps (h).
M	une grande constante.

Paramètres binaires

$FB_{a,a'}$	vaut 1 si le produit ou l'eau a et le produit ou l'eau a' sont autorisés à être transportés de manière adjacente dans un pipeline.
$YO_{n,i,a}$	vaut 1 si le lot ancien $i \in IO_n$ dans le pipeline n consiste en un produit ou de l'eau $a \in APU_{WM+n}$.

$OS_{m,s,b}$	vaut 1 si le bac s de la station m contient le produit $b \in APS_{m,s}$ au début de l'horizon d'ordonnancement.

Variables continues

t_k	point de temps (date d'un événement donné (h)) où $t_1 = 0$ et $t_{KM} = TL$.
l_k	durée de l'intervalle de temps (t_k, t_{k+1}), $l_k = t_{k+1} - t_k$ (h).
$h_{n,i,k}$	coordonnée volumétrique supérieure du lot i dans le pipeline n à t_k (m^3).
$lx_{n,j,i,k}$	durée d'injection dans $(j = 1)$ ou de décharge de $(j = 2)$ du lot i pendant (t_k, t_{k+1}) dans le pipeline n (h).
$v_{n,j,i,k}$	volume du lot i que la station j injecte dans ou décharge du pipeline n pendant (t_k, t_{k+1}) (m^3).
$vp_{n,j,i,a,k}$	volume de produit ou d'eau a du lot i que le pipeline n injecte dans ou décharge de la station j pendant (t_k, t_{k+1}) (m^3).
$vmcp_{p,k}$	volume de produit p que la station terminale fournit à son client pendant (t_k, t_{k+1}) (m^3).
$vmt_{m,s,k}$	niveau de stock dans le bac s de la station m à t_k (m^3).
$w_{n,i,k}$	volume du lot i dans le pipeline n à t_k (m^3).
$bw_{q,a,k}$	durée de traitement d'une décision d'ordonnancement $a \in APU_q$ dans la laverie q pendant (t_k, t_{k+1}) (h).
$lw_{q,a,k}$	durée totale de traitement de l'ordonnancement continu de la décision $a \in APU_q$ dans la laverie q jusqu'à l'intervalle de temps (t_k, t_{k+1}) (h).
$lbw_{q,a,k}$	variable utilisée pour linéariser le produit de $yw_{q,a,k}$ et $bw_{q,a,k-1}$ (h).
ltr_k	durée de l'opération de transfert pendant (t_k, t_{k+1}) (h).
$qlpr_k$	quantité du produit local déchargé dans le bac local de la station terminale pendant (t_k, t_{k+1}) (m^3).

Variables binaires

$sp_{n,k}$	vaut 1 si le pipeline n est actif pendant (t_k, t_{k+1}) (pas à l'arrêt).
$x_{n,j,i,k}$	vaut 1 si l'origine ou la destination j injecte dans ou décharge du lot i pendant (t_k, t_{k+1}) dans le pipeline n.
$y_{n,i,a}$	vaut 1 si le lot i est planifié dans le pipeline n contenant le produit ou l'eau a.
$qst_{m,s,b,k}$	vaut 1 si le bac s contient le produit b à t_k dans la station m. $qst_{m,s,b,k}$ est défini uniquement pour les bacs multiproduits, c'est-à-dire $\lvert APS_{m,s} \rvert > 1$.
$yw_{q,a,k}$	vaut 1 si la laverie q traite $a \in APU_q$ pendant (t_k, t_{k+1}).

$ew_{q,a,k}$	vaut 1 si l'intervalle de temps (t_k, t_{k+1}) coïncide avec la fin du traitement de $a \in APU_q$ dans q (la fin d'un lot de produit ou d'un arrêt).
$avp_{m,s,k}$	vaut 1 si le bac s de la station m est vide à t_k. $avp_{m,s,k}$ est défini si $\lvert APS_{m,s} \rvert > 1$.
tr_k	vaut 1 si l'opération de transfert est active pendant (t_k, t_{k+1}).
lpr_k	vaut 1 si le produit local P_1 arrivant à la station terminale est stocké dans le bac local $S_{4,1}$ dédié au traitement chimique pendant (t_k, t_{k+1}), sinon, il est stocké dans le bac de transfert $S_{4,2}$ et $lpr_k = 0$.

Ces variables, ainsi que les paramètres définis précédemment, constituent les composants du modèle MILP présenté dans la section suivante.

2.2. Fonction objectif

La fonction objectif vise à maximiser l'utilisation des pipelines pour le transport des produits pendant l'horizon d'ordonnancement (t_1, t_{KM}). L'expression $\sum_{n \in N} QIA_n \times TL$ représente la capacité totale de tous les pipelines en termes de volume théorique maximum pouvant être transporté pendant la durée de l'horizon d'ordonnancement d'injection H_1, tandis que $\sum_{n \in N} \sum_{i \in \{IOM_n, \ldots, IM_n\}} \sum_{k \in \{1, \ldots, KM-1\}} vp_{n,1,i,PM+1,k}$ signifie le volume total d'eau injecté dans les pipelines pendant l'horizon d'ordonnancement H_1.

$$\text{Maximiser } Z \text{ où } Z = \frac{\sum_{n \in N} QIA_n \times TL - \sum_{n \in N} \sum_{i \in \{IOM_n, \ldots, IM_n\}} \sum_{k \in \{1, \ldots, KM-1\}} vp_{n,1,i,PM+1,k}}{\sum_{n \in N} QIA_n \times TL} \qquad (3.1)$$

2.3. Contraintes temporelles

Comme illustré dans la Figure 3.2, le début de l'horizon d'ordonnancement est défini comme le temps t_1, tandis que le dernier point de temps pour les opérations d'injection dans le pipeline principal est égal à la durée de l'horizon d'ordonnancement $t_{KM} = TL$. Après t_{KM}, tous les lots injectés présents dans le pipeline principal sont entièrement déchargés pendant H_2, commençant à t_{KM} et se terminant à $t_{KM+INM_{NM}}$. Le paramètre INM_{NM} représente le nombre de nouveaux lots à planifier pendant H_1 dans le pipeline principal numéroté NM, et il sert de nombre de nœuds de temps pour

l'horizon d'ordonnancement H_2. Le ratio $\frac{F_{NM}}{QIA_{NM}}$ représente la durée totale de transport dans le pipeline principal de 26.5 heures, suffisante pour une décharge complète puisque les arrêts sont interdits dans le pipeline principal. Les contraintes (3.2), (3.3) et (3.4) représentent les calculs des limites temporelles.

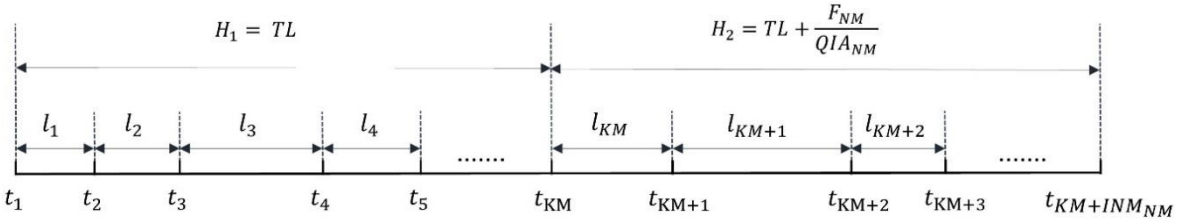


Figure 3.2. Décomposition du temps d'ordonnancement pour les opérations de chargement à la station de tête

$$t_1 = 0 \tag{3.2}$$

$$t_{KM} = TL \tag{3.3}$$

$$t_{KM+INM_{NM}} = TL + \frac{F_{NM}}{QIA_{NM}} \tag{3.4}$$

La contrainte (3.5) établit la connexion entre deux nœuds de temps successifs. Pendant chaque intervalle de temps l_k pour $k \in \{1, \dots, KM-1\}$, une seule et unique décision doit être prise dans chaque laverie, une injection et une décision de déchargement, ou bien une décision d'arrêt doit être prise dans un pipeline secondaire et une seule décision de transfert et de filtration doit être prise. Pour le reste des intervalles de temps dans H_2, nous sommes intéressés uniquement par la prise d'une décision de déchargement du pipeline principal à chaque intervalle de temps l_k pour $k \in \{KM, \dots, KM + INM_{NM} - 1\}$.

$$t_{k+1} = t_k + l_k \qquad \forall\, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM} - 1\} \tag{3.5}$$

Une borne inférieure τ est considérée pour chaque intervalle de temps l_k comme dans la contrainte (3.6). τ correspond à la durée minimale pour qu'un événement se produise dans la chaîne de valeur, ce qui est l'ordonnancement d'une quantité minimale de lot d'eau dans le pipeline principal.

$$l_k \geq \tau \qquad \forall\, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM} - 1\} \qquad (3.6)$$

2.4. Laveries

Chaque laverie $q \in \{1, \dots, WM\}$ utilise du minerai de phosphate prétraité pour produire un produit $p \in APU_q$. Nous considérons des ressources abondantes à l'entrée de chaque laverie. Le débit de production $QR_{q,p}$ de p dans une laverie q est uniforme. De plus, la durée de traitement d'une décision d'ordonnancement $a \in APU_q$ dans la laverie q pendant l_k est définie comme $yw_{q,a,k}$. Pendant chaque intervalle de temps de H_1, une seule et unique décision $a \in APU_q$ (une décision de production ou un arrêt) doit être prise dans la laverie q comme présenté dans l'équation (3.7).

$$\sum_{a \in APU_q} yw_{q,a,k} = 1 \qquad \forall\, q \in WS, k \in \{1, \dots, KM - 1\} \qquad (3.7)$$

Les laveries nécessitent une durée minimale de configuration après chaque changement de produit. Une durée minimale d'arrêt de WST_q heures doit être planifiée avant de commencer la production d'un nouveau lot de produit dans la laverie q. Comme présenté dans la contrainte (3.8), si une décision a est prise pendant l_{k-1} dans q ($yw_{q,a,k-1} = 1$), les décisions autorisées à prendre pendant l_k sont soit : la même décision a ou une décision d'arrêt ($yw_{q,PM+1,k} = 1$).

$$\forall\, q \in WS, a \in APU_q \backslash \{PM + 1\}, k \in \{1, \dots, KM - 1\}:$$
$$yw_{q,a,k-1} \leq yw_{q,a,k} + yw_{q,PM+1,k} \qquad (3.8)$$

Comme montré dans les contraintes (3.9) et (3.10), $yw_{q,a,k}$ est égal au produit de la variable binaire $yw_{q,a,k}$ et de la variable continue l_k. Par conséquent, $bw_{q,a,k}$ est égal à l_k si et seulement si $yw_{q,a,k} = 1$. Sinon, $bw_{q,a,k} = 0$. La formulation des contraintes indicatrices est utilisée pour modéliser certaines des décisions conditionnelles dans le reste du chapitre, comme dans les contraintes (3.9) et (3.10).

$$\forall\, q \in WS, a \in APU_q, k \in \{1, \dots, KM - 1\}:$$
$$yw_{q,a,k} = 1 \rightarrow bw_{q,a,k} = l_k \qquad (3.9)$$

$$yw_{q,a,k} = 0 \rightarrow bw_{q,a,k} = 0 \quad (3.10)$$

La durée cumulative continue de l'ordonnancement d'une décision $a \in APU_q$ (production ou arrêt) jusqu'à l'intervalle de temps l_k dans la laverie q est définie comme $lw_{q,a,k}$. Cette variable est déterminée pour garantir le respect des contraintes de taille minimale de lot et de durée minimale de configuration. La variable $lbw_{q,a,k}$ est introduite pour vérifier si la décision d'ordonnancement a est prise pendant (t_k, t_{k+1}). Si c'est le cas, $lbw_{q,a,k} = lw_{q,a,k-1}$; sinon, $lbw_{q,a,k} = 0$. Les équations (3.11), (3.12), (3.13), et (3.14) résument les calculs de $lw_{q,a,k}$ et $lbw_{q,a,k}$. La Figure 3.3 fournit une illustration pour un exemple de $bw_{q,a,k}$, $lbw_{q,a,k}$ et $lw_{q,a,k}$ où : $q \in WS$, $APU_q = \{1,4\}$ et $PM + 1 = 4$.

$\forall\, q \in WS, a \in APU_q$:

$$lw_{q,a,1} = bw_{q,a,1} \quad (3.11)$$

$\forall\, q \in WS, a \in APU_q\,, k \in \{2, \dots, KM - 1\}$:

$$lw_{q,a,k} = bw_{q,a,k} + lbw_{q,a,k} \quad (3.12)$$

$$yw_{q,a,k} = 1 \rightarrow lbw_{q,a,k} = lw_{q,a,k-1} \quad (3.13)$$

$$yw_{q,a,k} = 0 \rightarrow lbw_{q,a,k} = 0 \quad (3.14)$$

	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5
$yw_{q,1,k}$	1	1	1	1	0
$yw_{q,4,k}$	0	0	0	0	1
$bw_{q,1,k}$	l_1	l_2	l_3	l_4	0
$bw_{q,4,k}$	0	0	0	0	l_5
$lbw_{q,1,k}$	-	$yw_{q,1,2} \times lw_{q,1,1} = l_1$	$l_1 + l_2$	$l_1 + l_2 + l_3$	$yw_{q,1,5} \times lw_{q,1,4} = 0$
$lbw_{q,4,k}$	-	$yw_{q,4,2} \times lw_{q,4,1} = 0$	0	0	$yw_{q,4,5} \times lw_{q,4,4} = 0$
$lw_{q,1,k}$	$bw_{q,1,1} = l_1$	$bw_{q,1,2} + lbw_{q,1,2} = l_1 + l_2$	$l_1 + l_2 + l_3$	$l_1 + l_2 + l_3 + l_4$	$bw_{q,1,5} + lbw_{q,1,5} = 0$
$lw_{q,4,k}$	$bw_{q,4,1} = 0$	$bw_{q,4,2} + lbw_{q,4,2} = 0$	0	0	$bw_{q,4,5} + lbw_{q,4,5} = l_5$

Figure 3.3. Exemple des calculs de $lw_{q,a,k}$ et $lbw_{q,a,k}$

Afin de suivre le temps de fin d'une décision d'ordonnancement $a \in APU_q$, la variable binaire $ew_{q,a,k}$ est introduite. $ew_{q,a,k} = 1$ si l'intervalle de temps (t_k, t_{k+1}) coïncide avec la fin d'un lot de produit ou la fin d'un arrêt. Comme présenté dans les contraintes (3.15), (3.16) et (3.17), $ew_{q,a,k}$ peut être égal à 1 seulement si le produit a est planifié pendant (t_k, t_{k+1}) dans la laverie q et une autre décision $z \neq a$ est planifiée pendant (t_{k+1}, t_{k+2}) ($\sum_{z \in APU_q, z \neq a} yw_{q,z,k+1} = 1$). Sinon, $ew_{q,a,k} = 0$.

$\forall\, q \in WS, a \in APU_q, k \in \{1, \dots, KM-2\}$:

$$ew_{q,a,k} \geq yw_{q,a,k} + \sum_{z \in APU_q, z \neq a} yw_{q,z,k+1} - 1 \quad (3.15)$$

$$ew_{q,a,k} \leq \sum_{z \in APU_q, z \neq a} yw_{q,z,k+1} \quad (3.16)$$

$$ew_{q,a,k} \leq yw_{q,a,k} \quad (3.17)$$

Comme présenté dans les contraintes (3.18) et (3.19), une contrainte de taille minimale de lot est considérée pour chaque lot de produit et une durée minimale est considérée pour chaque décision d'arrêt dans toutes les laveries $q \in WS$. Si la fin d'un lot de produit $a \in APU_q \backslash \{PM+1\}$ est détectée $(ew_{q,a,k} = 1)$ pendant (t_k, t_{k+1}), la quantité cumulative du lot contenant a jusqu'à l_k doit être supérieure à la taille minimale de lot $VBWS_{q,a}$. Dans le cas d'une décision d'arrêt se terminant à (t_k, t_{k+1}) $(ew_{q,PM+1,k} = 1)$, la durée cumulative d'ordonnancement de l'arrêt $lw_{q,PM+1,k}$ doit être supérieure à la durée de configuration WST_q.

$\forall\, q \in WS, a \in APU_q \backslash \{PM+1\}, k \in \{2, \dots, KM-2\}$:

$$QR_{q,a} \times lw_{q,a,k} \geq VBWS_{q,a} \times ew_{q,a,k} \quad (3.18)$$

$\forall\, q \in WS, k \in \{2, \dots, KM-2\}$:

$$lw_{q,PM+1,k} \geq WST_q \times ew_{q,PM+1,k} \quad (3.19)$$

2.5. Contraintes de volumes et d'allocation des produits

L'ordre dans lequel les lots sont injectés dans le pipeline n avant le début de l'horizon d'ordonnancement est prédéterminé et utilisé pour initialiser la variable binaire $y_{n,i,a}$. La Figure 3.4 illustre l'état initial des lots présents dans le pipeline n

avant le début de l'horizon d'ordonnancement. Le lot $i = 1$ est le premier lot injecté et il est le plus proche de la destination du pipeline n, tandis que le lot IOM_n est le dernier lot injecté et il est le plus proche de son origine.

$$y_{n,i,a} = YO_{n,i,a} \qquad \forall\, n \in N, i \in IO_n, a \in APU_{WM+n} \tag{3.20}$$



Figure 3.4. Initialisation des lots IO_n présents dans le pipeline n à $t_1 = 0$

Chaque lot nouvellement introduit i dans le pipeline n pendant l'horizon d'ordonnancement H_1 est limité à contenir soit un produit, soit de l'eau. Si le lot i ne contient ni produit ni eau, il est traité comme un lot fictif ayant un volume de zéro et aucune décision d'ordonnancement ne lui est associée.

$$\sum_{a \in APU_{WM+n}} y_{n,i,a} \leq 1 \qquad \forall\, n \in N, i \in IN_n \tag{3.21}$$

Les lots $i \in \{IOM_n + 1, \dots, IM_n\}$ dans le pipeline n sont sélectionnés un par un dans un ordre croissant, en commençant par $IOM_n + 1$, pour avoir une décision d'ordonnancement dédiée. Lorsqu'aucun autre lot de produit ou d'eau n'a besoin d'être planifié dans le pipeline n, le reste des lots est considéré comme des lots vides et ils sont arrangés après les lots planifiés comme présenté dans la contrainte (3.22).

$$\forall\, n \in N, i \in \{IOM_n + 1, \dots, IM_n - 1\}:$$
$$\sum_{a \in APU_{WM+n}} y_{n,i,a} \geq \sum_{a \in APU_{WM+n}} y_{n,i+1,a} \tag{3.22}$$

L'injection successive de deux différents produits dans le pipeline n est strictement interdite. Pour éviter les contaminations et faciliter l'identification des extrémités des lots à la fin du pipeline n, un lot d'eau doit être introduit entre deux lots de produit successifs. L'équation (3.23) garantit le respect de cette contrainte, en imposant $FB_{a,a'} = 0$ lorsque a et a' sont des produits différents.

$$\forall\, n \in N, i \in IN_n, a \in APU_{WM+n}, a' \in APU_{WM+n}, \text{ and } a \neq a':$$

$$y_{n,i,a} + y_{n,i+1,a'} \leq 1 + FB_{a,a'} \quad (3.23)$$

Au début de l'horizon d'ordonnancement, le pipeline n peut continuer à injecter le dernier lot d'initialisation IOM_n, le plus proche de son origine, avec des volumes supplémentaires. Les contraintes concernant la taille minimale et maximale de IOM_n sont définies dans les équations (3.24) et (3.25).

$\forall\, n \in N, a \in APU_{WM+n}$:

$$WO_{n,IOM_n} \times y_{n,IOM_n,a} + \sum_{k=1}^{KM-1} vp_{n,1,IOM_n,a,k} \geq VBPI_{n,a} \times y_{n,IOM_n,a} \quad (3.24)$$

$$WO_{n,IOM_n} \times y_{n,IOM_n,a} + \sum_{k=1}^{KM-1} vp_{n,1,IOM_n,a,k} \leq VBPA_{n,a} \times y_{n,IOM_n,a} \quad (3.25)$$

Les contraintes dictant les tailles minimales et maximales des lots restants sont présentées par les équations (3.26) et (3.27).

$\forall\, n \in N, i \in IN_n, a \in APU_{WM+n}$:

$$\sum_{k=1}^{KM-1} vp_{n,1,i,a,k} \geq VBPI_{n,a} \times y_{n,i,a} \quad (3.26)$$

$$\sum_{k=1}^{KM-1} vp_{n,1,i,a,k} \leq VBPA_{n,a} \times y_{n,i,a} \quad (3.27)$$

2.6. Suivi des lots dans les pipelines

Comme présenté dans la contrainte (3.28), au début de l'horizon d'ordonnancement t_1, la variable $w_{n,i,1}$ représentant le volume du lot $i \in IO_n$ dans le pipeline n est initialisée avec les volumes des lots d'initialisation. Pour le reste des nouveaux lots $i \in IN_n$, le volume initial $w_{n,i,1}$ est mis à zéro pendant t_1 comme présenté dans la contrainte (3.29).

$$w_{n,i,1} = WO_{n,i} \qquad \forall\, n \in N, i \in IO_n \quad (3.28)$$

$$w_{n,i,1} = 0 \qquad \forall\, n \in N, i \in IN_n \quad (3.29)$$

À chaque moment t_{k+1} des horizons d'ordonnancement H_1, le volume du lot i dans le pipeline n ($w_{n,i,k+1}$) est mis à jour en fonction de la somme de son volume pendant t_k, du volume injecté dedans pendant l_k ($v_{n,1,i,k}$) et la soustraction du volume déchargé à la fin du pipeline n (contrainte 3.30). Pendant l'horizon d'ordonnancement

H_2, seules les opérations de déchargement sont considérées, vu que l'objectif est de décharger complètement les lots présents dans le pipeline principal sans introduire de nouvelles décisions de chargement pendant cette période (contrainte 3.31).

$\forall\, n \in N, i \in I_n,\ k \in \{1, \dots, KM-1\}$:

$$w_{n,i,k+1} = w_{n,i,k} + v_{n,1,i,k} - v_{n,2,i,k} \tag{3.30}$$

$\forall\, i \in I_{NM},\ k \in \{KM, \dots, KM + INM_{NM} - 1\}$:

$$w_{NM,i,k+1} = w_{NM,i,k} - v_{NM,2,i,k} \tag{3.31}$$

La position d'un lot dans le pipeline n est déterminée par deux coordonnées volumétriques, qui représentent le volume total traversé par les extrémités du lot à l'intérieur du pipeline. La coordonnée supérieure est située plus près de la fin du pipeline, tandis que la coordonnée inférieure est positionnée plus près de l'origine du pipeline. La coordonnée supérieure du lot i dans le pipeline n est déterminée en ajoutant la position supérieure du lot $i + 1$ au volume du lot i, comme présenté dans la contrainte (3.32).

$$\forall \begin{cases} n \in N\backslash\{NM\}, i \in \{1, \dots IM_n - 1\}, k \in \{1, \dots, KM\} \\ n = NM, i \in \{1, \dots IM_{NM} - 1\}, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM}\} \end{cases} :$$

$$h_{n,i,k} = h_{n,i+1,k} + w_{n,i,k} \tag{3.32}$$

Des contraintes supplémentaires sont nécessaires pour assurer le calcul précis de la variable $h_{n,i,k}$. Les coordonnées supérieures des premiers et derniers lots planifiés dans le pipeline n doivent être définies. Comme présenté dans l'équation (3.33), la coordonnée inférieure du dernier lot IM_n introduit dans le pipeline n est fixée à zéro. Par conséquent, la coordonnée supérieure de ce lot est égale à son volume. Dans la contrainte (3.34), le lot $i = 1$ introduit dans le pipeline n est situé le plus loin de l'origine, et sa coordonnée supérieure est égale au volume du pipeline n.

$$h_{n,IM_n,k} = w_{n,IM_n,k} \qquad \forall\, n \in N, k \in \{1, \dots, KM\} \tag{3.33}$$

$$h_{n,1,k} = F_n \qquad \forall \begin{cases} n \in N\backslash\{NM\}, k \in \{1, \dots, KM\} \\ n = NM, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM}\} \end{cases} \tag{3.34}$$

La coordonnée supérieure de chaque lot dans un pipeline n doit être contrainte à être inférieure à son volume. Cette restriction garantit que la position volumétrique de

chaque lot, représentée par sa coordonnée supérieure, reste dans les limites définies par le volume du pipeline.

$$h_{n,i,k} \leq F_n \qquad \forall \begin{cases} n \in N \backslash \{NM\}, i \in I_n, k \in \{1, \dots, KM\} \\ n = NM, i \in I_n, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM}\} \end{cases} \tag{3.35}$$

Si la station d'origine injecte le lot i dans le pipeline n pendant l'intervalle de temps l_k, la coordonnée inférieure du lot i doit être zéro aux deux nœuds temporels t_k et t_{k+1}, comme exprimé dans les équations (3.36) et (3.37). Cette condition garantit que la coordonnée inférieure du lot est située à l'origine du pipeline.

$\forall\, n \in N, i \in IN_n, k \in \{1, \dots, KM - 1\}$:

$$h_{n,i,k} - w_{n,i,k} \leq F_n \times (1 - x_{n,1,i,k}) \tag{3.36}$$

$$h_{n,i,k+1} - w_{n,i,k+1} \leq F_n \times (1 - x_{n,1,i,k}) \tag{3.37}$$

Comme présenté dans l'équation (3.38), si un lot i est déchargé à la fin du pipeline n pendant l'intervalle de temps (t_k, t_{k+1}), sa coordonnée volumétrique supérieure doit être égale au volume du pipeline.

$$\forall \begin{cases} n \in N \backslash \{NM\}, i \in I_n, k \in \{1, \dots, KM - 1\} \\ n = NM, i \in I_n, k \in \{\mathrm{KM}, \dots, KM + INM_{NM} - 1\} \end{cases} :$$

$$h_{n,i,k+1} \geq F_n \times x_{n,2,i,k} \tag{3.38}$$

2.7. Opérations de pipeline : processus de chargement et de déchargement

La durée d'injection ou de déchargement du lot i dans le pipeline n à la station j pendant l'intervalle de temps (t_k, t_{k+1}) est déterminée par les expressions fournies dans les équations (3.39) et (3.40). De plus, la quantité relative à l'opération d'injection ou de déchargement est calculée en utilisant l'équation (3.43). Pour les opérations de déchargement au-delà de la fin de l'horizon d'ordonnancement des opérations d'injection H_1, les quantités et durées pour le pipeline principal NM sont calculées en utilisant les contraintes (3.41), (3.42), et (3.44).

$\forall\, n \in N, j \in J, i \in I_n, k \in \{1, \dots, KM-1\}$:

$$x_{n,j,i,k} = 1 \rightarrow lx_{n,j,i,k} = l_k \quad (3.39)$$

$$x_{n,j,i,k} = 0 \rightarrow lx_{n,j,i,k} = 0 \quad (3.40)$$

$\forall\, i \in I_{NM}, k \in \{KM, \dots, KM + INM_{NM} - 1\}$:

$$x_{NM,2,i,k} = 1 \rightarrow lx_{NM,2,i,k} = l_k \quad (3.41)$$

$$x_{NM,2,i,k} = 0 \rightarrow lx_{NM,2,i,k} = 0 \quad (3.42)$$

$\forall\, n \in N, j \in J, i \in I_n, k \in \{1, \dots, KM-1\}$:

$$v_{n,j,i,k} = QIA_n \times lx_{n,j,i,k} \quad (3.43)$$

$\forall\, i \in I_{NM}, k \in \{KM, \dots, KM + INM_{NM} - 1\}$:

$$v_{NM,2,i,k} = QIA_{NM} \times lx_{NM,2,i,k} \quad (3.44)$$

La variable $v_{n,j,i,k}$ est le volume du lot i que la station j injecte dans ou décharge du pipeline n pendant (t_k, t_{k+1}). Cette quantité est calculée comme la somme de $vp_{n,j,i,a,k}$ à travers toutes les décisions d'ordonnancement $a \in APU_{WM+n}$, comme défini dans les contraintes (3.45) et (3.46).

$\forall\, n \in N, j \in J, i \in I_n, k \in \{1, \dots, KM-1\}$:

$$v_{n,j,i,k} = \sum_{a \in APU_{WM+n}} vp_{n,j,i,a,k} \quad (3.45)$$

$\forall\, i \in I_{NM}, k \in \{KM, \dots, KM + INM_{NM} - 1\}$:

$$v_{NM,2,i,k} = \sum_{a \in APU_{WM+NM}} vp_{NM,2,i,a,k} \quad (3.46)$$

La contrainte spécifiée dans l'équation (3.21) garantit que pendant tout intervalle de temps donné l_k, un seul produit au maximum ou de l'eau peut être injecté ou déchargé d'un pipeline n. Les contraintes (3.47) et (3.48) établissent une limite supérieure pour la valeur de $\sum_{k=1}^{KM-1} vp_{n,j,i,a,k}$ dans le cas où $y_{n,i,a} = 1$, ainsi que l'application de $\sum_{k=1}^{KM-1} vp_{n,j,i,a,k} = 0$ dans le cas où $y_{n,i,a} = 0$.

$\forall\, n \in N, j \in J, i \in I_n, a \in APU_{WM+n}$:

$$\sum_{k=1}^{KM-1} vp_{n,j,i,a,k} \leq QIA_n \times TL \times y_{n,i,a} \quad (3.47)$$

$\forall\, i \in I_{NM}, a \in APU_{WM+NM}$:

$$\sum_{k=KM}^{KM+INM-1} vp_{NM,2,i,a,k} \leq F_{NM} \times y_{NM,i,a} \quad (3.48)$$

La relation entre la quantité pouvant être injectée ou déchargée d'un pipeline n et la durée de l'intervalle de temps l_k est définie dans les équations (3.49) et (3.50). De plus, si $\sum_{i=1}^{IM_n} x_{n,j,i,k} = 0$, indiquant qu'aucun lot n'est planifié dans n pendant l'intervalle de temps l_k, les contraintes (3.49) et (3.50) deviennent redondantes.

$\forall\, n \in N, j \in J, k \in \{1, \dots, KM - 1\}$:

$$\frac{\sum_{i=1}^{IM_n} v_{n,j,i,k}}{QIA_n} \leq l_k \leq \frac{\sum_{i=1}^{IM_n} v_{n,j,i,k}}{QIA_n} + TL \times (1 - \sum_{i=1}^{IM_n} x_{n,j,i,k}) \quad (3.49)$$

$\forall\, k \in \{KM, \dots, KM + INM_{NM} - 1\}$:

$$\frac{\sum_{i=1}^{IM_{NM}} v_{NM,2,i,k}}{QIA_{NM}} \leq l_k \leq \frac{\sum_{i=1}^{IM_{NM}} v_{NM,2,i,k}}{QIA_{NM}} + \frac{F_{NM}}{QIA_{NM}} \times (1 - \sum_{i=1}^{IM_{NM}} x_{NM,2,i,k}) \quad (3.50)$$

Si la station d'origine ($j = 1$) injecte un lot i dans le pipeline n pendant l'intervalle de temps (t_k, t_{k+1}), il est impératif que les lots $i' \in \{i + 1, \dots, IM_n\}$ n'aient pas été injectés dans le pipeline n avant t_k. La contrainte (3.51) garantit un ordre d'injection séquentiel correct.

$\forall\, n \in N, i \in \{\mathrm{IOM}_n, \dots, IM_n - 1\}, k \in \{2, \dots, KM - 1\}$:

$$x_{n,1,i,k} + \sum_{i'=i+1}^{IM_n} \sum_{k'=1}^{k-1} x_{n,1,i',k'} \leq 1 + IM_n \times KM \times (1 - x_{n,1,i,k}) \quad (3.51)$$

Une station d'origine est restreinte d'injecter des volumes supplémentaires dans les lots d'initialisation d'un pipeline n, à l'exception du lot IOM_n, qui est le plus proche de l'origine du pipeline. Cette contrainte est satisfaite dans l'équation (3.52).

$$\sum_{k=1}^{KM-1} x_{n,1,i,k} = 0 \qquad \forall\, n \in N, i \in \{1, \dots, IOM_n - 1\} \quad (3.52)$$

Pendant chaque intervalle de temps (t_k, t_{k+1}), si un pipeline n est en arrêt, aucun produit ou eau ne peut être injecté ou déchargé. À l'inverse, si le pipeline est opérationnel, les contraintes (3.53) et (3.54) dictent qu'au maximum un produit peut être injecté à l'origine et déchargé à la fin du pipeline pendant (t_k, t_{k+1}).

$$\sum_{i=1}^{IM_n} x_{n,j,i,k} = sp_{n,k} \qquad \forall\, n \in N, j \in J, k \in \{1, \dots, KM - 1\} \quad (3.53)$$

$$\sum_{i=1}^{IM_{NM}} x_{NM,2,i,k} = sp_{NM,k} \qquad \forall\, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM} - 1\} \quad (3.54)$$

Les arrêts du pipeline principal sont rares et coûteux. Par conséquent, les pratiques industrielles favorisent la planification de l'eau si aucun produit n'est injecté dans le pipeline principal, comme présenté dans la contrainte (3.55). Cette contrainte peut être relaxée pour prendre en compte les arrêts du pipeline. Pour les autres pipelines, les arrêts sont encouragés pour réduire la quantité totale d'eau planifiée.

$$sp_{NM,k} \geq 1 \qquad \forall\, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM} - 1\} \qquad (3.55)$$

2.8. Opération de transfert

En raison de la forte demande pour le produit local P_1, deux bacs lui sont dédiés à la station terminale : $S_{4,1}$ et $S_{4,2}$. $S_{4,1}$ est directement connecté aux unités de traitement chimique, tandis que $S_{4,2}$ est connecté au bac $S_{4,1}$ via le pipeline de transfert. Les lots entrants de P_1 à la station terminale peuvent être stockés soit dans $S_{4,1}$, soit dans $S_{4,2}$. Comme présenté dans les contraintes (3.56) et (3.57), la variable $qlpr_k$ représente la quantité de P_1 déchargée dans $S_{4,1}$ pendant la période l_k. La quantité de P_1 déchargée dans $S_{4,2}$ est calculée comme $\sum_{i=1}^{IM_{NM}} vp_{NM,2,i,1,k} - qlpr_k$.

$\forall\, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM} - 1\}$:

$$lpr_k = 1 \rightarrow qlpr_k = \sum_{i=1}^{IM_{NM}} vp_{NM,2,i,1,k} \qquad (3.56)$$

$$lpr_k = 0 \rightarrow qlpr_k = 0 \qquad (3.57)$$

La durée de l'opération de transfert pendant une période l_k est définie dans les équations (3.58) et (3.59), où tr_k est la variable binaire représentant la décision de transfert.

$\forall\, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM} - 1\}$:

$$tr_k = 1 \rightarrow ltr_k = l_k \qquad (3.58)$$

$$tr_k = 0 \rightarrow ltr_k = 0 \qquad (3.59)$$

2.9. Contraintes de demande à la station terminale

Pour répondre à la demande continue pour les produits $cp \in CP$, il est nécessaire de livrer précisément la quantité déterminée par le taux de consommation de dc aux clients locaux. Cela garantit que la demande est constamment satisfaite.

$\forall\, cp \in CP, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM} - 1\}$:

$$vmcp_{dc,k} = VMPD_{dc} \times l_k \tag{3.60}$$

Pour le reste des produits $dp \in DP$, il est nécessaire de satisfaire au moins la demande totale $VMPD_{dp}$ avant la fin de l'horizon d'ordonnancement.

$\forall\, dp \in DP$:

$$\sum_{k=1}^{KM+INM_{NM}-1} vmcp_{dp,k} \geq VMPD_{dp} \tag{3.61}$$

À chaque période l_k, la quantité totale livrée à l'unité de filtration ne doit pas dépasser sa capacité maximale de traitement, comme présenté dans la contrainte (3.62).

$vmcp_{dp,k} \leq FFU \times l_k$:

$$\forall\, dp \in DP, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM} - 1\} \tag{3.62}$$

2.10. Contraintes liées à la gestion des stocks

Certains des bacs considérés dans le problème étudié sont des bacs multiproduits capables de stocker différents produits à différentes périodes. Pour suivre le produit stocké dans le bac s dans la station m à un nœud temporel donné, la variable qst est introduite exclusivement pour les bacs multiproduits, où $|APS_{m,s}| > 1$.

Comme présenté dans les équations (3.63) et (3.64), le niveau de stock initial et le produit stocké dans chaque bac s dans chaque station m sont prédéfinis avant le début de l'horizon d'ordonnancement.

$\forall\, m \in M$ et $s \in S_m$ si $|APS_{m,s}| > 1$:

$$vmt_{m,s,1} = VMTO_{m,s} \tag{3.63}$$

$\forall\, m \in M, s \in S_m$ et $b \in APS_{m,s}$ si $|APS_{m,s}| > 1$:

$$qst_{m,s,b,1} = OS_{m,s,b} \quad (3.64)$$

Un seul produit est autorisé à être stocké dans un bac s à un moment t_k dans la station m, comme exprimé dans l'équation (3.65). Cette contrainte permet d'éviter la contamination des produits, en empêchant le mélange de plusieurs produits dans le même bac.

$$\text{si } |APS_{m,s}| > 1 \; \forall \begin{cases} m \in M\backslash\{MM\}, s \in S_m, k \in \{1, \dots, KM\} \\ m = MM, s \in S_m, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM}\} \end{cases}:$$

$$\sum_{b \in APS_{m,s}} qst_{m,s,b,k} = 1 \quad (3.65)$$

Un changement de produit dans un bac s dans la station m à t_k est autorisé uniquement lorsque s est inoccupé. La variable binaire $avp_{m,s,k}$ peut être égale à 1 si le niveau du bac $vmt_{m,s,k}$ est égal à zéro. La définition de $avp_{m,s,k}$ est fournie dans l'équation (3.66).

$$\text{si } |APS_{m,s}| > 1 \; \forall \begin{cases} m \in M\backslash\{MM\}, s \in S_m, k \in \{1, \dots, KM\} \\ m = MM, s \in S_m, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM}\} \end{cases}:$$

$$avp_{m,s,k} \leq 1 - \frac{vmt_{m,s,k}}{M} \quad (3.66)$$

Comme présenté dans la contrainte (3.67), si un produit b est stocké dans le bac s dans la station m à t_k, un produit différent peut être stocké dans s à t_{k+1} seulement si le bac est vide ($avp_{m,s,k+1} = 1$). Dans le cas où le bac s n'est pas vide, il est obligé de continuer à stocker le même produit.

$$\text{si } |APS_{m,s}| > 1 \; \forall \begin{cases} m \in M\backslash\{MM\}, s \in S_m, b \in APS_{m,s}, k \in \{1, \dots, KM - 1\} \\ m = MM, s \in S_m, b \in APS_{m,s}, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM} - 1\} \end{cases}:$$

$$qst_{m,s,b,k+1} \geq qst_{m,s,b,k} - avp_{m,s,k+1} \quad (3.67)$$

La variable $qst_{m,s,b,k}$ peut être égale à 1 sous deux conditions. Premièrement, si $qst_{m,s,b,k-1} = 1$ comme décrit dans l'équation (3.67). Deuxièmement, en cas de changement de produit, soit en raison du déchargement du produit b dans le bac s depuis une laverie ou un pipeline. Des contraintes supplémentaires sont appliquées aux pipelines, exigeant qu'un produit b ne puisse être injecté dans un pipeline que si un bac

dans sa station d'origine contient le produit b. Ces contraintes s'appliquent au bacs multiproduits ($|APS_{m,s}| > 1$), et sont décrites dans les équations (3.68) à (3.74). Les équations (3.68) et (3.69) concernent les bacs des laveries, les équations (3.70) à (3.72) s'appliquent aux bacs de la station de tête, et les équations (3.73) et (3.74) concernent les bacs de la station terminale.

si $|APS_{m,s}| > 1 \; \forall \; m \in \{1,2\}, s \in S_m, k \in \{1, \dots, KM-1\}, b \in APS_{m,s}$:

$$M \times qst_{m,s,b,k} \geq yw_{m,b,k} \tag{3.68}$$

$$M \times qst_{m,s,b,k} \geq \sum_{i=1}^{IM_m} vp_{m,1,i,b,k} \tag{3.69}$$

si $|APS_{m,s}| > 1 \; \forall \; m = 3, s \in S_m, q \in \{3,4\}, k \in \{1, \dots, KM-1\}, b \in APS_{m,s} \cup APU_q$:

$$M \times qst_{m,s,b,k} \geq yw_{q,b,k} \tag{3.70}$$

si $|APS_{m,s}| > 1 \; \forall \; m = 3, s \in S_m, n \in \{1,2\}, k \in \{1, \dots, KM-1\}, b \in APS_{m,s} \cup APU_q$:

$$M \times qst_{m,s,b,k} \geq \sum_{i=1}^{IM_n} vp_{n,2,i,b,k} \tag{3.71}$$

si $|APS_{m,s}| > 1 \; \forall \; m = 3, s \in S_m, k \in \{1, \dots, KM-1\}, b \in APS_{m,s}$:

$$M \times qst_{m,s,b,k} \geq \sum_{i=1}^{IM_m} vp_{NM,1,i,b,k} \tag{3.72}$$

si $|APS_{m,s}| > 1 \; \forall \; m = 4, s \in S_m, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM} - 1\}, b \in APS_{m,s}$:

$$M \times qst_{m,s,b,k} \geq \sum_{i=1}^{IM_{NM}} vp_{NM,2,i,b,k} \tag{3.73}$$

$$vmcp_{b,k} \leq M \times qst_{m,s,b,k} \tag{3.74}$$

Les niveaux de stock de tous les bacs sont déterminés dans les équations (3.79) à (3.83). Le niveau de stock du bac s à t_{k+1} est calculé en additionnant son niveau de stock à t_k avec la quantité ajoutée des pipelines et des laveries, et en soustrayant la quantité prélevée par les clients ou les pipelines.

$\forall \; m \in \{1,2\}, s \in S_m, k \in \{1, \dots, KM-1\}$:

$$vmt_{m,s,k+1} = vmt_{m,s,k} + \sum_{p \in APS_{m,s}} bw_{m,p,k} \times QR_{m,p} - \sum_{p \in APS_{m,s}} \sum_{i=IOM_m}^{IM_m} vp_{m,1,i,p,k} \tag{3.75}$$

$\forall \; m = 3, s \in S_m, k \in \{1, \dots, KM-1\}$:

$$vmt_{m,s,k+1} = vmt_{m,s,k} + \sum_{q=3}^{4} \sum_{p \in APS_{m,s} \cap APU_q} bw_{q,p,k} \times QR_{q,p} + \sum_{n=1}^{2} \sum_{p \in APS_{m,s} \cap APU_{WM+n}} \sum_{i=1}^{IM_n} vp_{n,2,i,p,k} - \sum_{p \in APS_{m,s} \cap APU_{WM+NM}} \sum_{i=IOM_{NM}}^{IM_{NM}} vp_{NM,1,i,p,k} \tag{3.76}$$

$\forall\ m = 4, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM} - 1\}$:

$$vmt_{m,1,k+1} = vmt_{m,1,k} + qlpr_k + ltr_k \times TF - vmcp_{1,k} \quad (3.77)$$

$$vmt_{m,2,k+1} = vmt_{m,2,k} + \left(\sum_{i=1}^{IM_{NM}} vp_{NM,2,i,1,k} - qlpr_k\right) - ltr_k \times TF \quad (3.78)$$

$$vmt_{m,3,k+1} = vmt_{m,3,k} + \sum_{p \in APS_{m,3} \cap APU_{WM+NM}} \sum_{i=1}^{IM_{NM}} vp_{NM,2,i,p,k} - \sum_{p \in APS_{m,3}} vmcp_{p,k} \quad (3.79)$$

Le stock de chaque bac à t_k dans chaque station doit toujours rester dans la plage autorisée, comme indiqué par les contraintes (3.80) et (3.81).

$\forall\ m \in M \backslash \{MM\}, s \in S_m, k \in \{1, \dots, KM\}$:

$$VMTI_{m,s} \leq vmt_{m,s,k} \leq VMTA_{m,s} \quad (3.80)$$

$m = MM, s \in S_m, k \in \{1, \dots, KM + INM_{NM}\}$:

$$VMTI_{m,s} \leq vmt_{m,s,k} \leq VMTA_{m,s} \quad (3.81)$$

3. EXPERIMENTATIONS NUMERIQUES

Les expériences numériques ont été réalisées sur un PC équipé de deux processeurs AMD EPYC 7452 à 32 cœurs et de 512 Go de RAM, fonctionnant sous Linux (Ubuntu 20.04.5). Les instances ont été résolues en utilisant Gurobi 10.0.1. Le nombre de cœurs utilisés a été fixé à 64 avec l'Hyper-Threading désactivé. Dans cette section, nous commencerons par présenter l'étude de cas et les scénarios générés, suivis de la présentation des résultats et de l'évaluation des performances du modèle MILP proposé. Toutes les instances et résultats de cette étude sont mis à disposition pour référence.

3.1. Instances

Pour évaluer l'efficacité du modèle MILP proposé, un groupe de 10 scénarios distincts ont été générés en utilisant des ensembles de données réelles de la chaîne de valeur intégrée du site minier de Khouribga du Groupe OCP. Ces scénarios incluent un horizon d'ordonnancement pour les opérations d'injection dans les pipelines H_1 d'une

durée de 48 heures et un horizon d'ordonnancement global de $H_1 + H_2 = 74.5$ heures, permettant une décharge totale des lots contenus dans le pipeline principal après la fin de H_1. De plus, une longueur minimale pour tous les intervalles de temps de $\tau = 0.5$ heure est considérée. Les instances ont été formulées en fonction de plusieurs critères, tels que le nombre des produits du phosphate $PM \in \{1,2,3\}$, niveau de stock initial, les lots initiaux présents dans les pipelines et les demandes des clients tout au long de l'horizon d'ordonnancement. Il est important de noter que l'eau est traitée comme un produit séparateur et qu'elle n'est pas incluse dans le calcul de PM.

Le nombre de nœuds temporels KM et le nombre maximum de lots à injecter dans les pipelines INM_n où $n \in N$ sont prédéterminés pour chaque scénario en fonction des données historiques. Les valeurs de KM et INM_n sont choisies en fonction des expériences empiriques et dépendent du nombre de produits et de la durée de l'horizon d'ordonnancement.

Comme illustré dans la Figure 3.1, seuls les deux pipelines secondaires n_1 et n_2 sont considérés en plus du pipeline principal n_3. Le pipeline de transfert a un débit uniforme de $TF = 1000\ \mathrm{m}^3/\mathrm{h}$ et l'opération de filtration a un débit maximal de $FFU = 1000\ \mathrm{m}^3/\mathrm{h}$.

Tableau 3.1. Volumes et débits des pipelines

	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$
F_n	3375	2840	106000
QIA_n	1350	1420	4000

Comme indiqué dans le Tableau 3.1, le débit et le volume de chaque pipeline sont donnés. Le Tableau 3.2 fournit les débits des laveries, tandis que le Tableau 3.3 présente le nombre maximum de nouveaux lots INM_n à planifier dans chaque pipeline n. Les valeurs de INM_n ont été standardisées en fonction des caractéristiques de chaque pipeline, de la durée de l'horizon d'ordonnancement et du nombre de produits. Ces valeurs ne doivent pas être trop petites pour éviter l'infaisabilité ou un impact négatif sur la fonction objectif. À l'inverse, elles ne doivent pas être excessivement grandes

pour éviter un impact négatif sur le temps CPU sans amélioration substantielle de la valeur de la fonction objectif.

Tableau 3.2. Débits des laveries

	$p = 1$	$p = 2$	$p = 3$
w_1	1100	1100	1100
w_2	1550	1550	1550
w_3	1100	1100	1100
w_4	500	500	500

Tableau 3.3. Nombre de nouveaux lots dans les pipelines

	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$
$PM = 1$	9	3	11
$PM = 2$	9	3	10
PM = 3	9	3	7

En réalité, il est crucial que les niveaux de stock des bacs soient maintenus dans des limites opérationnelles, généralement fixées entre 13 % et 90 %. Par souci de simplicité, sans perte de généralité, seule la capacité de stockage utile est considérée, comme présenté dans le Tableau 3.4. De plus, des contraintes sur les tailles des lots sont considérées pour chaque produit $a \in P$ et pour l'eau $a = PM + 1 = 4$ dans tous les pipelines. Le Tableau 3.5 présente les valeurs pour $VBPA_{n,a}$ et $VBPI_{n,a}$. De plus, pour chaque laverie q, une taille minimale de lot de 4000 m^3 est appliquée à tous les produits et une durée minimale de configuration $WST_q = 1$ h est considérée.

Tableau 3.4. Niveaux de stock maximum et minimum autorisés dans les bacs

$VMTA_{m,s}$	$s = 1$	$s = 2$	$s = 3$
$m = 1$	5000	-	-
$m = 2$	9000	-	-
$m = 3$	9000	9000	-
m = 4	9000	12000	12000

$VMTO_{m,s}$	$s = 1$	$s = 2$	$s = 3$
$m = 1$	0	-	-
$m = 2$	0	-	-
$m = 3$	0	0	-
$m = 4$	0	0	0

Tableau 3.5. Tailles maximales et minimales des lots dans les pipelines

$VBPA_{n,a}$	$a=1$	$a=2$	$a=3$	water
$n=1$	80000	20000	20000	10000
$n=2$	80000	20000	20000	10000
n = 3	80000	20000	20000	8000

$VBPI_{n,a}$	$a=1$	$a=2$	$a=3$	water
$n=1$	4000	4000	4000	500
$n=2$	4000	4000	4000	500
$n=3$	8000	4000	4000	2000

Pour chaque laverie et chaque pipeline u, les décisions d'ordonnancement autorisées à se dérouler dans u sont préalablement données. Le Tableau 3.6 (a) illustre toutes les décisions autorisées pour chaque unité u, où une valeur de 1 indique que la décision d'ordonnancement a est autorisée dans u, et 0 indique qu'elle est interdite. Une décision a correspond aux produits $a \in P$, et $a = PM + 1$ représente une décision d'arrêt pour les laveries ou un lot d'eau pour les pipelines. De plus, le Tableau 3.6 (b) présente les produits autorisés à être stockés dans chaque bac.

Les lots de produits ne sont pas autorisés à être transportés consécutivement dans les pipelines pour éviter les contaminations par mélanges et assurer la conformité aux spécifications de composition des produits. Pour répondre à cette contrainte, un lot d'eau est planifié entre différents lots de produits. Le Tableau 3.7 fournit les valeurs binaires d'entrée pour $FB_{a,a'}$, égales à 1 si deux lots de a et a' sont autorisés à être planifiés consécutivement, et $FB_{a,a'} = 0$ sinon.

Tableau 3.6. Décisions autorisées dans les pipelines et laveries et produits autorisés dans les bacs

	$a=1$	$a=2$	$a=3$	$a=4$
w_1	1	1	1	1
w_2	1	0	0	1
w_3	1	0	0	1
w_3	1	0	0	1
n_1	1	1	1	1
n_2	1	0	0	1
n_3	1	1	1	1

(a) Décisions autorisées pour les unités

		$p=1$	$p=2$	$p=3$
$m=1$	$s=1$	1	1	1
$m=2$	$s=1$	1	0	0
$m=3$	$s=1$	1	0	0
	$s=2$	0	1	1
$m=4$	$s=1$	1	0	0
	$s=2$	1	0	0
	$s=3$	0	1	1

(b) Produits autorisés pour les bacs

Tableau 3.7. Produits autorisés à être transportés consécutivement dans un pipeline

$FB_{a,a'}$	$a'=1$	$a'=2$	$a'=3$	$a'=4$
$a=1$	0	0	0	1
$a=2$	0	0	0	1
$a=3$	0	0	0	1
$a=4$	1	1	1	0

Les données présentées ci-dessus sont des données structurelles définissant le problème étudié et sont partagées entre toutes les instances. Les données fournies ci-dessous sont spécifiques à la configuration du problème et uniques pour chaque instance. Le Tableau 3.8 décrit la demande globale pour chaque produit sur l'ensemble de l'horizon d'ordonnancement $H_1 + H_2 = 74.5$ h. Le Tableau 3.9 fournit le niveau de stock initial de chaque bac dans toutes les stations, en plus des produits initialement stockés, présentés par un code couleur. Le Tableau 3.10 présente l'état initial des pipelines, indiquant la quantité et le produit présents dans chaque lot IO_n. Les lots sont numérotés du plus éloigné au plus proche de l'origine du pipeline n, et les produits sont présentés par le même code couleur.

Tableau 3.8. Quantité totale de la demande

Instance	$p=1$	$p=2$	$p=3$
1	254418	6000	6000
2	238400	8000	8000
3	263730	6000	6000
4	248830	4000	9000
5	271925	10000	0
6	257025	10000	0
7	252555	6000	0
8	276395	0	0
9	288315	0	0
10	290550	0	0

Tableau 3.9. Quantité de stock initial des bacs et produits initialement stockés

Instance	$S_{1,1}$	$S_{2,1}$	$S_{3,1}$	$S_{3,2}$	$S_{4,1}$	$S_{4,2}$	$S_{4,3}$
1	2955	4370	5568	1399	4836	1547	2763
2	1725	1568	1853	0	7537	2421	0
3	1643	7696	7468	0	3986	4175	6320
4	4376	8244	1980	1474	6440	1944	5190
5	529	6118	3097	3487	8377	6052	2785
6	2879	584	4635	2814	1986	8570	0
7	4325	8896	2871	0	7672	6640	375
8	3983	8790	6256	0	1982	8540	0
9	4869	556	7452	0	5887	690	0
10	2868	7490	3826	0	6642	9349	0

p_1 p_2 p_3 water

Tableau 3.10. Lots initiaux dans les pipelines

Instance	$n=1$	$n=2$	$n=3$						
	$i=1$	$i=1$	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$
1	3375	2840	18000	2000	4000	2000	74000	6000	
2	3375	2840	20000	2000	8000	2000	38000	10000	26000
3	3375	2840	64000	8000	34000				
4	3375	2840	6000	48000	2000	4000	2000	44000	
5	3375	2840	24000	8000	74000				
6	3375	2840	58000	2000	4000	2000	40000		
7	3375	2840	20000	8000	32000	6000	40000		
8	3375	2840	74000	6000	26000				
9	3375	2840	48000	4000	54000				
10	3375	2840	28000	2000	76000				

3.2. Résultats numériques

Tableau 3.11. Résultats numériques

			24h time limit			GAP<=1% or 1h time limit		
Instance	PM	KM	Obj val	CPU time (s)	GAP	Obj val	CPU time (s)	GAP
1	3	19	97.53%	1669	**0%**	97.18%	1244	0.68%
		20	97.73%	5266	**0%**	96.96%	2381	0.95%
		21	97.73%	6280	**0%**	97.17%	1467	0.76%
		22	97.73%	11783	**0%**	97.01%	1396	0.97%
		23	97.73%	86400	0.03%	97.06%	1717	0.94%
		24	97.73%	86400	0.06%	97.41%	865	0.6%
2	3	19	93.66%	47620	**0%**	93.26%	3600	3.39%
		20	94.19%	86400	1.03%	93.63%	3600	3.16%
		21	94.78%	86400	0.79%	93.79%	3600	3.31%
		22	95.08%	86400	1.01%	93.39%	3600	3.80%
		23	95.19%	86400	1.62%	93.53%	3600	4.12%
		24	96.09%	86400	0.62%	94.35%	3600	3.14%
3	3	19	97.55%	3527	**0%**	97.16%	437	0.82%
		20	97.55%	86400	0.08%	97.55%	3600	0.12%
		21	97.73%	2081	**0%**	97.04%	959	0.97%
		22	97.73%	3381	**0%**	97.28%	1225	0.70%
		23	97.73%	4214	**0%**	96.98%	1293	0.99%
		24	97.73%	4750	**0%**	97.23%	1375	0.77%
4	3	19	95.88%	7204	**0%**	95.10%	3600	1.73%
		20	96.14%	20003	**0%**	95.74%	3600	1.22%
		21	96.14%	44328	**0%**	94.36%	3600	2.82%
		22	96.14%	86400	0.06%	95.89%	3600	1.01%
		23	96.14%	86400	0.42%	94.25%	3600	3.44%
		24	96.51%	31252	**0%**	94.58%	3600	3.39%
5	2	19	97.12%	2453	**0%**	96.55%	521	0.83%
6	2	19	95.29%	13781	**0%**	95.11%	2906	0.87%
7	2	19	94.66%	41500	**0%**	94.01%	3600	1.54%
8	1	13	98.42%	7	**0%**	98.15%	5	0.23%
9	1	13	98.15%	10	**0%**	97.44%	8	0.73%
10	1	13	98.15%	6	**0%**	98.15%	6	**0%**

Les résultats obtenus pour les instances définies précédemment sont présentés dans le Tableau 3.11. Pour les instances 1 à 4, trois produits sont considérés, et différentes valeurs de KM sont prises en compte pour comparaison. Pour les autres instances, les résultats sont rapportés pour la valeur empirique choisie de KM. Comme indiqué dans le Tableau 3.11, deux configurations sont utilisées : la première avec une limite de temps de 24 heures, garantissant l'optimalité dans la plupart des cas ou une quasi-optimalité pour le reste. Pour des raisons pratiques, une seconde configuration se base sur deux critères d'arrêt : soit atteindre une limite de temps d'une heure, soit atteindre une valeur de GAP inférieure ou égale à 1%. La solution est immédiatement rapportée si l'un des deux critères est atteint. Des solutions de bonne qualité sont trouvées en moins d'une heure et aucune amélioration substantielle de la fonction objectif n'est observée par rapport à la solution obtenue après 24 heures.

3.2.1. Choix du paramètre KM

En utilisant les instances 1 à 4 présentées dans le Tableau 3.11, les valeurs moyennes des fonctions objectifs et du temps CPU pour chaque valeur du paramètre KM sont calculées et illustrées dans la Figure 3.5. Comme le montre le graphique, $KM = 19$ donne les valeurs de la fonction objectif les moins favorables mais avec le temps CPU le plus court, tandis que $KM = 24$ atteint les meilleures valeurs de la fonction objectif, bien que nécessitant beaucoup plus de temps CPU. Basé sur des expériences empiriques antérieures, le paramètre $KM = 21$ est jugé comme un choix standard pour les scénarios impliquant trois produits et un horizon d'ordonnancement de $H_1 = 48$ h. De plus, il a été observé que les choix de valeurs standard de KM sont corrélés linéairement avec la longueur de l'horizon d'ordonnancement H_1.

Pour un horizon d'ordonnancement $H_1 = 48\,h$, et pour des scénarios avec deux produits, $KM = 19$ est choisi, tandis que pour les instances impliquant un seul produit, $KM = 13$ est sélectionné. Le choix de KM vise à trouver un bon équilibre entre la qualité de solution et le temps CPU.

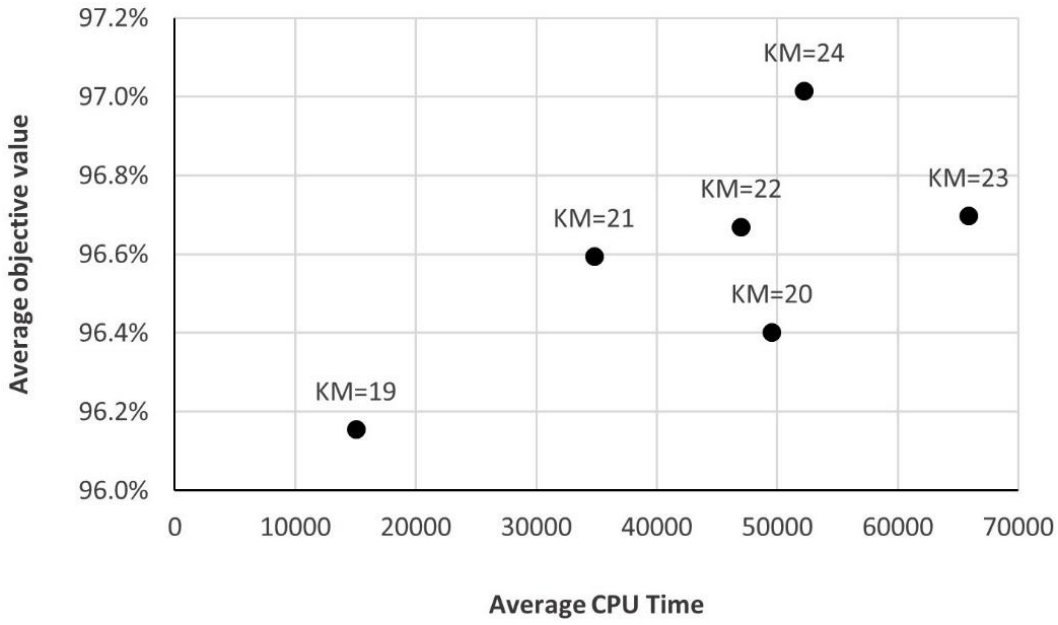


Figure 3.5. Valeurs moyennes des fonctions objectifs pour les cas où PM = 3

3.2.2. Convergence du modèle MILP

La Figure 3.6 illustre les courbes de convergence pour les instances 1 à 4. Notamment, une forte convergence est observée avant le cap des 3600 secondes, indiqué par la ligne rouge verticale. Dans la phase initiale, les solutions sont rapidement générées, résultant en un GAP de moins de 5,2% dans la première heure pour toutes les instances. Le GAP atteint 1% à un rythme relativement rapide mais nécessite un temps CPU relativement long pour atteindre l'optimalité. Cela peut être attribué à la complexité du problème, qui découle du grand nombre de variables et de constantes prises en compte. En raison des besoins industriels et de la nature du problème opérationnel, une limite de temps d'une heure est choisie.

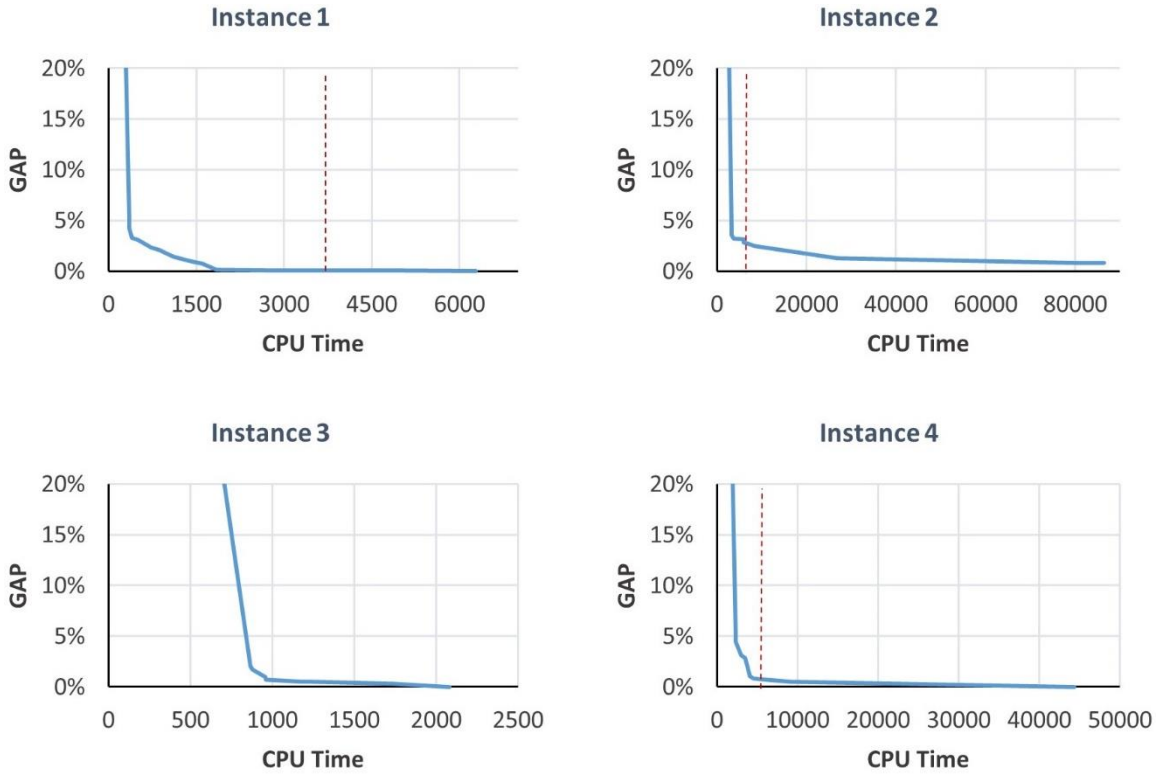


Figure 3.6. Courbes de convergence

3.2.3. Décisions d'ordonnancement pour l'instance 1

Le diagramme de Gantt de la Figure 3.7 illustre l'ordonnancement de toutes les unités. Il présente les plannings d'injection et de déchargement des pipelines, l'ordonnancement des opérations des laveries, l'ordonnancement des opérations de transfert, ainsi que les valeurs des variables binaires de lpr, indiquant si P_1 est déchargé dans $S_{4,1}$ (lorsque lpr est égal à 1) ou, alternativement, dans $S_{4,1}$. Trois produits sont considérés pour un horizon d'ordonnancement de $H_1 + H_2 = 48 + 26.5$ h. De plus, la Figure 3.8 présente l'évolution des niveaux de stock des bacs au fil du temps.

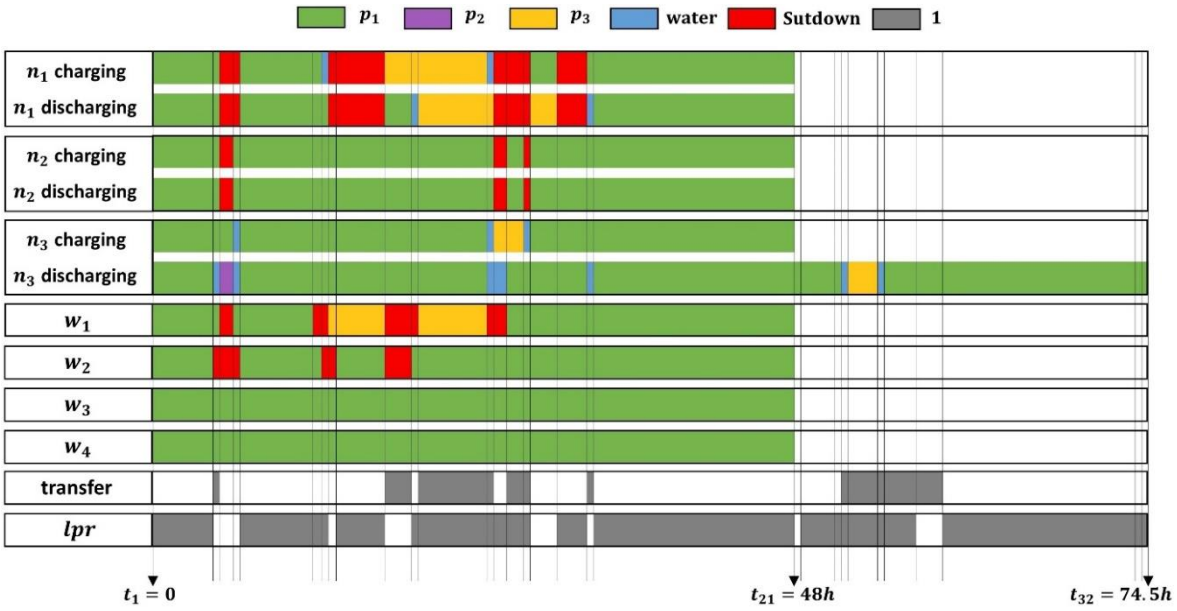


Figure 3.7. Ordonnancement détaillée des opérations pour l'instance 1

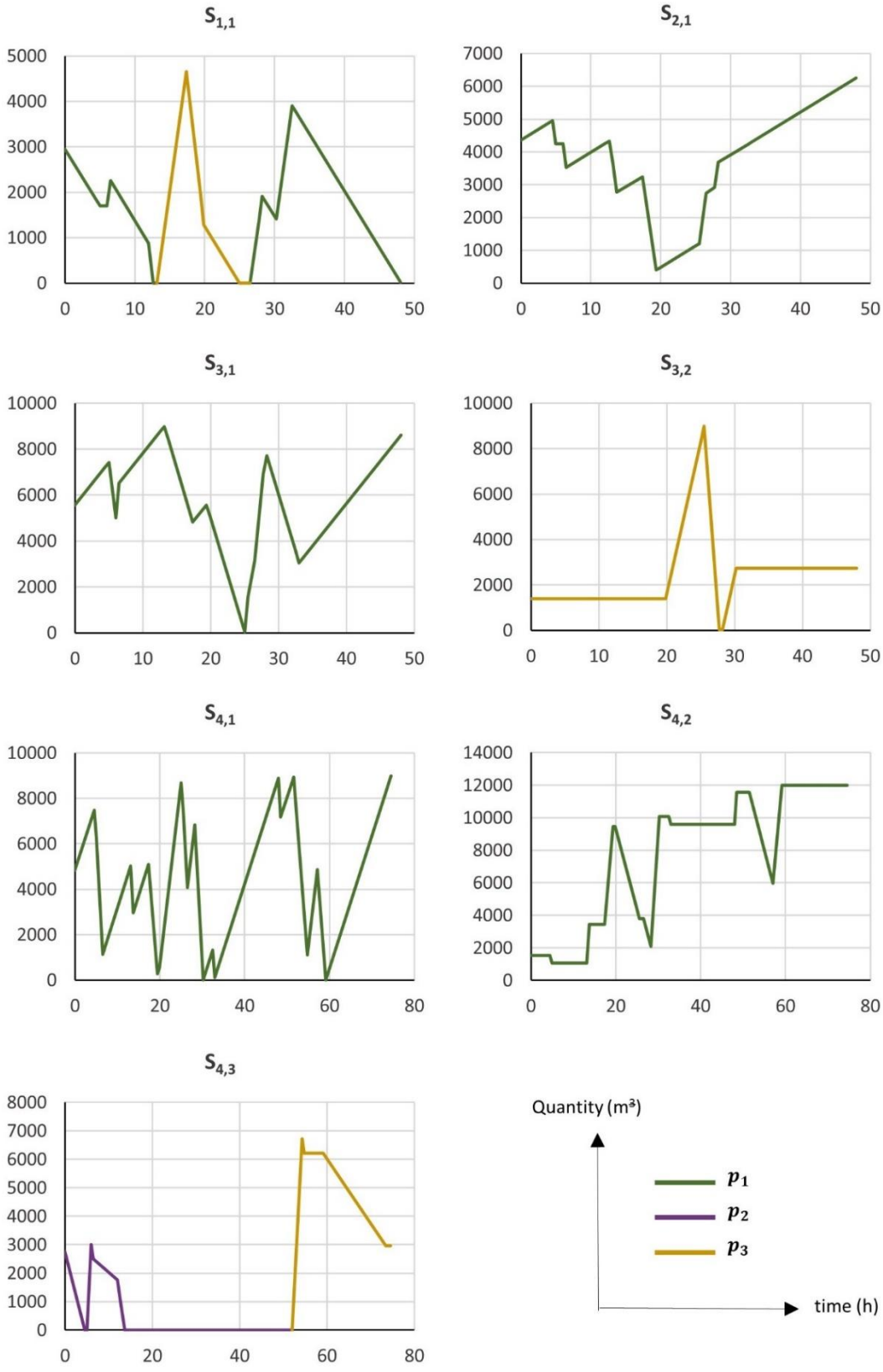


Figure 3.8. Niveaux de stock des bacs pour l'instance 1

4. CONCLUSION

Dans ce chapitre, un modèle MILP est proposé pour aborder un problème réel d'ordonnancement intégré de la production et de la distribution, dans le contexte de l'industrie minière du phosphate. La chaîne de valeur intégrée s'étend des laveries, utilisées pour la production de minerai de phosphate, aux clients situés au bout d'un réseau de pipelines multiproduits de longue distance. Le problème d'ordonnancement étudié comprend un sous-problème d'ordonnancement de la production, incorporant des contraintes liées à la taille des lots et aux durées de configuration en cas de changement de produit ; un sous-problème d'ordonnancement du réseau de pipelines multiproduits prenant en compte des contraintes sur la taille des lots, la séquence des lots et le suivi des lots ; et un sous-problème de gestion des stocks multiproduits avec une politique de stockage partagé pour plusieurs bacs. De plus, des opérations spécifiques à ce problème, telles que la filtration et le transfert, sont également considérées. L'objectif global est de fournir un ordonnancement détaillé des opérations, respectant toutes les contraintes opérationnelles, satisfaisant la demande des clients et maximisant le taux d'utilisation des pipelines.

Un ensemble de 10 instances a été généré en se basant sur la chaîne de valeur de phosphate intégrée du site minier de Khouribga du Groupe OCP. Un processus de choix des paramètres, basé sur des données empiriques a été présenté pour le choix du nombre d'intervalles de temps composant l'horizon d'ordonnancement. Le modèle MILP proposé a pu fournir des solutions satisfaisantes en moins d'une heure, en faisant une alternative fiable à l'ordonnancement manuel.

Chapitre 4 : Approche heuristique pour un problème réel d'ordonnancement intégré de la production et de la distribution

Ce chapitre reproduit et étend les résultats et les conclusions de l'article publié suivant :

Mouad SIDKI, Sidki, M., Tchernev, N., Féniès, P., Ren, L., & Elfirdoussi, S. (2025). **Heuristic based decision approach for an integrated slurry pipeline network scheduling in the phosphate industry.** Expert Systems with Applications, 126495. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.126495

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte de recherche

Dans ce chapitre, notre objectif est de traiter un problème d'ordonnancement dans une chaîne de valeur intégrée dans l'industrie minière. Cette recherche est inspirée par le cas de la chaîne de valeur de phosphate intégrée du site minier de Khouribga du Groupe OCP. Le site minier de Khouribga contient la majorité des réserves de phosphate du Maroc, produisant 70 % du minerai de phosphate du groupe. La chaîne de valeur intégrée du site minier de Khouribga englobe l'ensemble du processus d'extraction du minerai de phosphate, de sa production, et de sa livraison aux clients. Cette chaîne de valeur est organisée en plusieurs niveaux, qui comprennent des zones minières, des laveries, des bacs de stockage et des clients, tels qu'une station de traitement chimique pour les clients locaux et le port de Jorf Lasfar pour les clients internationaux.

Le minerai de phosphate est extrait de diverses mines, chacune contenant des couches géologiques de phosphate distinctes avec des concentrations variables de BPL (Bone Phosphate Lime) et d'autres composants chimiques. Le minerai de phosphate extrait subit une série d'étapes de traitement, y compris des opérations d'extraction et de valorisation dans les laveries. La valorisation du minerai de phosphate est un processus industriel impliquant principalement des traitements physiques tels que la séparation, la classification, le lavage et la calcination. Le minerai de phosphate traité est broyé puis lavé, le rendant prêt pour la livraison aux clients et à un traitement ultérieur, comme le traitement chimique pour la production d'engrais. Le minerai de phosphate traité se présente sous forme de pulpe hydrophobe, une suspension de particules insolubles de roche phosphatée dans une phase continue d'eau. La taille des particules et la concentration sont ajustées pour le transport par pipeline et la pulpe doit être séchée avant d'être transportée par rail ou par mer.

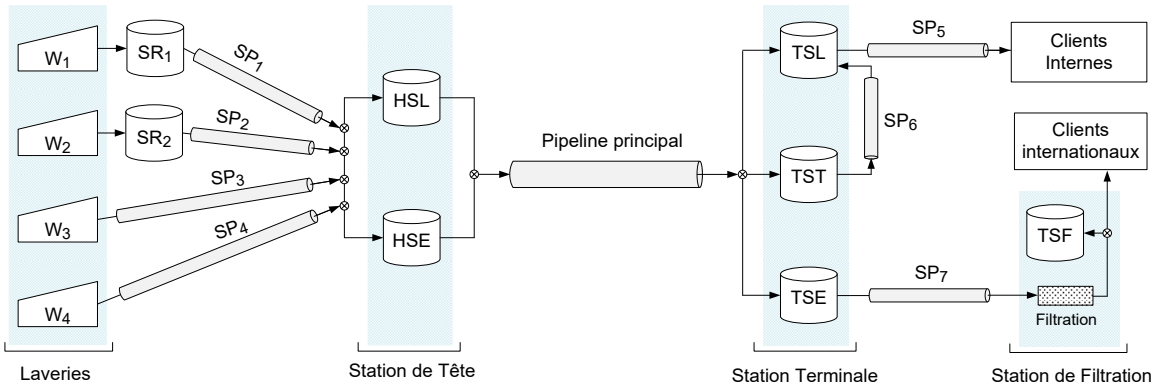


Figure 4.1. Vue d'ensemble schématique de la chaîne d'approvisionnement intégrée de production et de distribution

Le minerai de phosphate traité peut être transporté des laveries aux clients soit par train, soit par un réseau de pipelines. Afin de réduire les coûts logistiques et de contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre associées au séchage et au transport ferroviaire du minerai de phosphate traité, le Groupe OCP a lancé en 2014 un projet de construction d'un réseau de pipelines d'une longueur totale de 235 km. Ce réseau de pipelines facilite le transport des minerais de phosphate du site minier de Khouribga à Jorf Lasfar au Maroc. Le transport par train ne devient plus le mode de transport principal suite à la mise en place du réseau de pipelines. Le complexe

industriel de Jorf Lasfar traite la majorité de la pulpe de phosphate reçue pour produire différents produits tels que l'acide phosphorique et une large gamme d'engrais. Le reste de la slurry de phosphate est séché puis stocké pour être exporté ultérieurement via le port de Jorf Lasfar.

Le périmètre d'étude de ce chapitre se concentre sur le segment de la chaîne de valeur de l'Axe Khouribga qui comprend les laveries et le système de transport par réseau de pipelines, ainsi que les centres de stockage multiproduits pour le stockage du minerai de phosphate valorisé. Comme l'illustre la Figure 4.1, le réseau de pipelines considéré se compose d'un pipeline principal appelé "slurry pipeline" et de plusieurs pipelines secondaires reliant les laveries, la station de tête, la station terminale et les clients. Le réseau de pipelines assure une livraison continue de la pulpe à la station terminale, un exploit qui serait bien plus difficile à réaliser avec les modes de transport traditionnels, tels que les trains et les camions, surtout sans l'utilisation de grands stocks.

1.2. Définition du problème et hypothèses

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur un problème d'ordonnancement d'un réseau de pipelines multiproduits dans l'industrie du phosphate appliqué à un problème opérationnel réel. Comme illustré à la Figure 4.1, différentes qualités commerciales de minerai de phosphate, désignées par produits, sont produites dans les laveries. Chaque laverie (W_i) est reliée à la station de tête via l'utilisation d'un pipeline secondaire droit (SP_i). Une laverie nécessite un bac de stockage uniquement si le débit de production diffère du débit de transport. La station de tête est reliée à la station terminale par le pipeline principal.

L'ensemble des produits, désigné par P, comprend un produit local (P_1) destiné aux clients locaux et plusieurs produits d'export (numérotés de 2 à $|P|$) pour les clients internationaux. Chaque laverie peut produire tous ces produits. Les laveries ont un temps de préparation lors du changement de qualité de production, ainsi qu'une une taille minimale de lot de production, équivalente à une durée minimale de production continue, qui doit être respectée. Pour les laveries W_1 et W_2, le débit de production

n'est pas égal au débit de pompage des pipelines secondaires associés. Par conséquent, les bacs SR_1 et SR_2 sont utilisés pour absorber la différence de débit dans ces laverie (Figure 4.1). Pour chaque produit dans une laverie, un score de priorité de production est fourni. Ce score est utile pour associer les produits des laveries à planifier.

Dans la station de tête, le bac *HSL* est réservé au produit local, et *HSE* est partagé entre les produits d'export. Un système de vannes est employé pour choisir entre les deux bacs pour injecter les lots dans le pipeline principal. À l'instar des pipelines secondaires, le pipeline principal a une condition de taille minimale de lot à respecter. De plus, deux lots de produits différents doivent être séparés par un volume d'eau dans un pipeline principal/secondaire. Aucun arrêt n'est autorisé pour le pipeline principal, sauf pour la maintenance préventive, et de l'eau est injectée lorsqu'aucun produit n'est prélevé des bacs de la station de tête. Une source d'eau infinie est considérée.

En raison de la demande relativement élevée des clients locaux, les deux premiers bacs de stockage (TSL et TST) à la station terminale sont dédiés au produit local et reliés par un pipeline secondaire. Le troisième bac de stockage (TSE) est partagé entre les produits d'export. Le produit local a un débit de consommation continue et un pipeline secondaire assure sa livraison continue aux unités de traitement chimique. Pour répondre aux besoins des unités de traitement chimique, le niveau de stockage des bacs dans la station terminale dédiés au produit local doit toujours être rempli avec au moins une quantité de sécurité si possible. Il est à noter qu'il existe une contrainte stricte exigeant la satisfaction des demandes des clients locaux. L'épuisement des stocks à la station terminale est hautement indésirable pour le produit local.

Les produits d'export sont envoyés à la station de filtration via un pipeline secondaire pour réduire la quantité d'eau dans la pulpe, puis ils sont stockés dans des bacs avant d'être livrés aux clients internationaux par voie maritime. De plus, un seul produit peut être stocké dans un bac à un moment donné. Par conséquent, les bacs pour les produits d'export doivent être vides avant de stocker un produit différent. Pour des raisons techniques, le niveau de stockage d'un bac doit toujours se situer entre une limite inférieure supérieure à 10 % et une limite supérieure inférieure à 90 % de la capacité du bac. Lorsque le produit qui est dans un bac doit être remplacé par un

nouveau, il reste encore une quantité du produit précédent. Par conséquent, une opération de rinçage doit être effectuée pour éviter la contamination lorsque la qualité du nouveau produit est supérieure à celle du précédent. Il est important de noter que seul le volume de stockage utile est considéré pour tous les bacs de stockage de l'ensemble $S = \{SR_1, SR_2, HSL, HSE, TSL, TST, TSE, TSF\}$. De plus, tous les bacs de stockage sont numérotés de 1 à |S| dans le reste du chapitre. L'opération de filtration produit une pulpe concentrée et un produit de déchet principalement constitué d'eau. Le déchet de filtration est temporairement stocké dans TSF jusqu'à ce que le bac atteigne sa capacité maximale, après quoi il est complètement vidé avant de continuer l'opération de filtration. D'autre part, la pulpe concentrée est distribuée aux clients selon des plannings de consommation prédéfinis, généralement à la fin de l'horizon d'ordonnancement.

La formulation du problème adopte une représentation en temps discret. L'ensemble de l'horizon temporel T est divisé en un ensemble de périodes de durée égale. Chaque période $t \in T$ est caractérisée par une date de début et une durée fixe. Nous considérons que les décisions d'ordonnancement liées à la chaîne de valeur considérée sont prises aux frontières des périodes de temps. T_{start} représente le début effectif de l'horizon d'ordonnancement, et T_{end} marque la fin de l'horizon temporel d'ordonnancement. T_1 est le début de l'horizon d'initialisation, qui se termine à ($T_{start} - 1$). $T = \{T_1, \dots, T_{start}, \dots, T_{end}\}$ englobe toutes les périodes de l'horizon d'ordonnancement.

Un lot est défini comme une quantité de pulpe de phosphate produite par un processus continu dans une laverie ou transportée par un pipeline pendant une durée donnée à un débit constant. Des décisions d'ordonnancement sont nécessaires pour chaque période à partir de T_{start} pour toutes les unités de la chaîne de valeur, y compris les laveries, les pipelines secondaires, le pipeline principal, les opérations de filtration et le pipeline de transfert reliant TST et TSL (Figure 4.1). À chaque période, le produit stocké et sa quantité doivent être indiqués pour tous les bacs de stockage. Les calculs des niveaux de stocks des bacs dépendent des décisions relatives aux pipelines, à la filtration et aux laveries. Pour les pipelines, les temps de début et de fin des opérations

de chargement des lots doivent également être déterminées. Tous les lots dans les pipelines sont destinés à un bac de stockage.

L'objectif est de trouver une solution d'ordonnancement qui fournit une liste de lots à traiter dans chaque laverie et une liste de lots à transporter par chaque pipeline, de sorte à répondre à la demande des clients sur un horizon temporel fixe, tout en minimisant le volume d'eau injecté dans le pipeline principal et tout en respectant les contraintes suivantes :

- Un lot est déchargé et stocké dans un bac une fois qu'il atteint la fin d'un pipeline.
- La capacité de stockage des bacs doit être respectée.
- La taille du lot doit se situer dans des limites supérieures et inférieures.
- Les contraintes de conservation du débit doivent être respectées pour chaque pipeline.
- Un seul produit peut être stocké dans un bac à une période donnée.
- Un seul produit peut être chargé dans un pipeline à une période donnée.
- Un seul produit peut être planifié dans une laverie à une période donnée.
- Un seul produit peut être transféré et filtré à une période donnée.
- Le pipeline secondaire reliant le bac de stockage *TSL* aux clients locaux doit fonctionner en mode continu avec un débit constant.

Les hypothèses suivantes sont considérées :

- Les pipelines sont toujours pleins et les produits qu'ils contiennent sont incompressibles.
- Le débit des pipelines est uniforme.
- Aucun arrêt n'est autorisé pour le pipeline principal pendant une période donnée, sauf pour la maintenance préventive.
- Les arrêts des pipelines secondaires sont autorisés en dehors de la maintenance préventive.
- Tous les bacs contiennent une quantité initiale d'un produit donné au début de l'horizon d'ordonnancement et les pipelines contiennent une liste de lots au début de l'horizon d'ordonnancement.

- Le remplissage et la vidange d'un bac de stockage peuvent être effectués simultanément.
- Seule la laverie avec le score de priorité le plus bas pour la production de P_1 est utilisée pour l'ordonnancement des produits dans $P\backslash\{P_1\}$, sur la durée prédéfinie de l'horizon d'ordonnancement.
- Une quantité suffisante de minerai de phosphate est présente à l'entrée des laveries pour produire toutes les quantités de produits nécessaires pour satisfaire les demandes des clients.
- La station de tête dispose d'une abondance d'eau.
- La demande annuelle pour P_1 représente plus de 90 % de la demande totale.
- Le problème est sensible au stockage. Par exemple, lors d'un pic de demande pour le produit P_1, les bacs TSL et TST ne peuvent pas couvrir les besoins des clients pendant plus de 4 heures.
- Afin de ne pas perdre en précision et pour que la solution d'ordonnancement proposée soit valide, les périodes doivent être inférieures à 15 minutes. Ce choix est justifié car il représente la durée minimale pour charger le pipeline principal avec une quantité minimale de lot de séparation d'eau. Par conséquent, la durée des périodes est fixée à 1/4 h.

1.3. Organisation du chapitre

Dans ce chapitre, une heuristique basée sur la simulation est choisie pour répondre au problème d'ordonnancement de la chaîne de valeur intégrée du réseau de pipelines considéré. L'objectif est de remplacer l'ordonnancement manuel, qui peut n'offrir qu'une vision limitée et être chronophage, en particulier lorsqu'il s'agit de longues distances de transport. L'objectif principal de l'heuristique est de fournir des plans d'ordonnancement détaillés et hautement fiables pour toutes les unités, des laveries jusqu'à la station terminale. L'approche heuristique est retenue afin de trouver une solution d'ordonnancement, qui peut être facilement comprise par l'équipe d'ordonnancement opérationnel et suivre des schémas prévisibles.

L'heuristique proposée s'appuie sur une approche de simulation à événements discrets. Pour approfondir, la simulation implique un ensemble de variables d'état et des mécanismes de changement des variables au fil du temps (Fishman, 2001). Une vision de modélisation de simulation fournit un cadre pour définir un système avec suffisamment de détails pour qu'il puisse être exécuté afin d'évaluer le comportement du système, pendant le processus de prise de décision, c'est-à-dire les décisions d'affectation et d'ordonnancement. Le problème en question utilise une formulation en temps discret et en taille de lot discrète. L'horizon d'ordonnancement est divisé en plusieurs périodes de temps de durée égale. À chaque période, plusieurs couches de simulations sont calculées en fonction des valeurs des variables des périodes précédentes pour déterminer une solution d'ordonnancement pour chaque composant de la chaîne de valeur. Pendant chaque période de l'horizon d'ordonnancement discret, des décisions d'ordonnancement sont prises pour toutes les unités de la chaîne de valeur, tout en respectant diverses contraintes industrielles.

La méthode heuristique utilisée pour obtenir les décisions d'ordonnancement repose sur une étude intensive des principes d'ordonnancement utilisés par l'équipe opérationnelle. Cela est fondamental pour une solution potentiellement très fiable, car elle assure des opérations d'ordonnancement cycliques à la fois confortables et compréhensibles par les équipes opérationnelles des différentes entités. L'heuristique proposée a fonctionné dans des conditions réelles durant 8 mois et a fourni efficacement (en quelques minutes) de meilleures solutions que celles de l'ordonnancement manuel.

Le reste du chapitre est organisé comme suit. Dans la section 2, l'heuristique proposée est décrite. La section 3 présente les résultats numériques pour deux études de cas réelles. Enfin, la section 4 présente les conclusions et les recherches futures.

2. HEURISTIQUE BASEE SUR LA SIMULATION

Ici, les variables de décision sont mises à jour progressivement en fonction des valeurs passées et de l'état du système à chaque période de l'horizon d'ordonnancement, une approche par activité est choisie pour implémenter l'heuristique : on décrit les activités dans lesquelles les différentes entités qui composent le système s'engagent.

Ainsi, un algorithme multi-niveau, basé sur une horloge, est développé, dans lequel les variables d'état de chaque ressource sont mises à jour simultanément à chaque période $t \in T$, en fonction des entrées actuelles et des valeurs précédentes des variables. Veuillez noter que, comme mentionné ci-dessus, l'ensemble $T = \{T_1, \dots, T_{start}, \dots, T_{end}\}$ contient toutes les périodes de l'horizon d'ordonnancement, et la référence spatiale est la station de tête pour la gestion du temps de l'horloge. Le temps de simulation d'un tel algorithme se compose de deux parties : la mise à jour des variables d'état et la propagation des décisions prises. L'algorithme 4.1 décrit le pseudo-code de l'algorithme multi-niveaux basé sur l'horloge proposée.

Algorithme 4.1. Heuristique basée sur la simulation

```
1.  Input
2.     Inst:   une instance du problème
3.  Output
4.     Plan:   un plan d'ordonnancement
5.  Begin
6.     //Initialisation
7.     Plan <- Scheduling_plan_initalization(Inst)        //Initialisation
8.     {Plan, Sol} <- System_state_initialization(Inst, Plan)
9.     //Ordonnancement du produit local
10.    {Plan, Sol} <- Local_product_scheduling(Inst, Plan, Sol)
11.    //Ordonnancement des produits d'export
12.    {Plan, Sol} <- Export_products_scheduling(Inst, Plan, Sol)
13.    Return Plan
14. End
```

Comme présenté dans l'algorithme 4.1, l'heuristique est composée des trois étapes suivantes :

- **Étape d'initialisation (lignes 7-8) :** L'initialisation consiste à créer un nouveau plan d'ordonnancement avec des décisions initiales de production et de transport (ligne 7) et à évaluer le plan obtenu, en tenant compte de l'état initial du réseau de pipelines (y compris les décisions initiales, les produits et quantités initialement présents dans les bacs, et l'ordonnancement résiduel qu'il faut encore exécuter dans les laveries). Le plan d'ordonnancement résultant est utilisé pour mettre à jour les niveaux de stocks et vérifier la satisfaction des contraintes de stockage (ligne 8).
- **Étape d'ordonnancement du produit local (ligne 10) :** Cette étape implique l'ordonnancement du produit local P_1 tout au long de l'horizon d'ordonnancement avec l'objectif de maximiser le temps entre la fin d'un lot et le début du suivant

dans le pipeline principal. Pour chaque période de l'horizon d'ordonnancement t de T_{start} à $(T_{end} - P_{mp})$, un ensemble de laveries est d'abord sélectionné pour la production du produit local. Veuillez noter que P_{mp} est le temps en nombre de périodes pour traverser l'intégralité du pipeline principal sans maintenance. Le produit local est ordonnancé sur les laveries sélectionnées et leurs pipelines secondaires relatifs un par un en fonction d'un ordre de priorité prédéfini. Un processus de réparation est exécuté pour supprimer les décisions connexes en cas de violation de toute contrainte. Dans l'étape suivante, le produit local est ordonnancé dans le pipeline principal et le pipeline de transfert (SP_5) après avoir simulé plusieurs décisions potentielles basées sur un ordre de priorité dérivé de l'état passé des décisions prises.

- **Étape d'ordonnancement des produits d'export (ligne 12) :** À cette étape, un lot d'eau est planifié comme séparateur dans le pipeline principal et les pipelines secondaires associés aux laveries pour éviter la contamination avant d'ordonner de nouveaux lots pour les produits d'export. La laverie avec le score de priorité le plus bas pour la production de P_1 est sélectionnée pour planifier les produits d'export. L'ordonnancement est effectué dans les fenêtres de temps disponibles créées lors de l'étape précédente. Par la suite, le pipeline de filtration (SP_7) et le pipeline principal sont planifiés.

À la fin du processus d'ordonnancement, un plan d'ordonnancement contenant un ensemble de décisions est obtenu. Un plan d'ordonnancement est conçu pour respecter toutes les contraintes et fournit un ensemble de décisions réalisables pour une utilisation opérationnelle. Dans les sections suivantes, une présentation détaillée de tous les composants de l'heuristique basée sur la simulation est fournie.

2.1. Étape d'initialisation

L'étape d'initialisation applique les algorithmes *Scheduling_plan_initialization* et *System_state_initialization* pour initialiser le plan d'ordonnancement et l'état du réseau de pipelines. L'algorithme 4.2, *Scheduling_plan_initialization*, commence par copier l'ensemble des lots planifiés dans chaque pipeline à partir des données initiales (lignes

16-18), suivi de l'initialisation des opérations de chargement pour tous les pipelines avec les numéros de lots correspondants pour les périodes d'initialisation de T_1 à $(T_{start} - 1)$ (lignes 21-24). Il est important de noter que chaque lot contient des informations sur le numéro de lot, le produit relatif, la taille du lot, l'origine (bac de stockage ou laverie) et la destination (bac de stockage ou client). Le plan d'ordonnancement initialisé est ensuite renvoyé à la fin (ligne 26).

Algorithme 4.2. Scheduling_plan_initalization

```
1.  Input
2.     Inst: une instance du problème, avec les éléments suivants utilisés ici:
3.       .id_MP: l'identifiant du pipeline principal
4.       .SP: l'ensemble des pipelines secondaires
5.       .IPD: décision initiale d'opérations de chargement pour pipeline pl à t
6.       .IBO: l'ensemble des lots planifiés initialement dans le pipeline pl
7.       .IBnC: le numéro de lot planifié dans le pipeline pl chargé à t
8.  Output
9.     Plan: un plan d'ordonnancement
10.      .WD: matrice des décisions de production pour la laverie w à t
11.      .PD: matrice des décisions de chargement pour le pipeline pl à t
12.      .BO: l'ensemble des lots planifiés dans le pipeline pl
13.      .BnC: le numéro de lot planifié dans le pipeline pl chargé à t
14. Begin
15.    Plan <- new scheduling plan
16.    For each pl in (Inst.SP U Inst.id_MP) Do
17.        Plan.BO[pl] <- Inst.IBO[pl]  //copier les lots planifié dans pl
18.    End For
19.    For t = Inst.T1 to (Inst.Tstart - 1) Do
20.       //Initialisation des décisions de chargement pour tous les pipelines
21.       For each pl in (Inst.SP U Inst.id_MP) Do
22.          Plan.PD[pl,t] <- Inst.IPD[pl,t]
23.          Plan.BnC[pl,t] <- Inst.IBnC[pl,t]
24.       End For
25.    End For
26.    Return Plan
27. End
```

Comme illustré dans l'algorithme 4.3, l'initialisation de l'état du réseau de pipelines commence par l'estimation du temps de transport pour tous les pipelines à l'aide de l'algorithme *All_transport_time_estimation* (ligne 8), avant la mise à jour des niveaux de stocks avec l'algorithme *Storage_update* (ligne 9). Ce dernier est également utilisé dans d'autres étapes après l'introduction de nouvelles décisions dans le plan d'ordonnancement. Toutes les informations sur l'état du réseau de pipelines, y compris la période relative de chargement/déchargement pour chaque décision de transport, les produits et quantités présents dans les bacs de stockage à chaque période, sont stockées dans une solution évaluée (lignes 8-9). La solution évaluée obtenue est retournée à la fin (ligne 10).

L'algorithme 4.4 décrit comment la période de chargement/déchargement relative d'un pipeline pour chaque période d'ordonnancement est estimée, avec la station de tête comme point de référence. Pour chaque pipeline connecté à la station de tête, les périodes de chargement ou de déchargement correspondantes de l'autre côté du pipeline sont précalculées, en tenant compte de la durée totale de transport et du profil d'arrêts. Un seul des axes temporels de chargement ou de déchargement est évalué pour les pipelines connectés à la station de tête.

Algorithme 4.3. System_state_initialization

```
1.  Input
2.     Inst: une instance du problème
3.     Plan: un plan d'ordonnancement
4.  Output
5.     Sol: une solution évaluée
6.  Begin
7.     Sol <- new Evaluated solution
8.     Sol <- All_transport_time_estimation(Inst, Plan)
9.     Sol <- Storage_update(Inst, Plan, Sol)
10.    Return {Plan, Sol}
11. End
```

Algorithme 4.4. All_transport_time_estimation

```
1.  Input
2.     Inst: une instance, avec les éléments suivants utilisés ici:
3.       .id_MP: l'identifiant du pipeline principal
4.     Plan: un plan d'ordonnancement
5.  Output
6.     Sol: une solution évaluée, avec les éléments suivants utilisés ici :
7.       .PT: périodes de chargement/déchargement correspondantes pour pl à t
8.  Begin
9.     // Estimation de la période de chargement pour les pipelines secondaires
10.    For pl = 1 to 4 Do
11.        Sol.PT[pl]<- Transport_time_proc(Inst,plan,pl,1)
12.    End For
13.    // Estimation de la période de déchargement pour le pipeline principal
14.    Sol.PT[Inst.id_MP] <-Transport_time_proc(Inst,plan,Inst.id_MP,2)
15.    Return Sol
16. End
```

L'algorithme 4.4 commence par calculer les périodes de chargement pour les pipelines aux laveries. Pour chaque pipeline secondaire pl numéroté de 1 à 4 (lignes 10-12), la période de chargement correspondante (aux laveries) pour chaque opération de déchargement (à la station de tête) à la période t de T_{start} à T_{end} est estimée à l'aide de l'algorithme *Transport_time_proc* en mode 1 (pour l'estimation des périodes de chargement). L'ensemble des périodes de chargement correspondantes obtenues pour le pipeline secondaire pl est stocké dans $PT[pl]$. Il est important de noter que la période

de déchargement t de pl est toujours supérieure à la période de chargement correspondante $PT[pl,t]$ (c'est-à-dire $PT[pl,t] < t$).

Pour le pipeline principal, pour chaque période de chargement t à la station de tête, l'estimation de la période de déchargement correspondante $PT[id_MP,t]$ à la station terminale est calculée à l'aide de l'algorithme *Transport_time_proc* en mode 2 (pour l'estimation des périodes de déchargement). Veuillez noter que la dernière période de chargement pour le pipeline principal à la station de tête est $(T_{end} - P_{mp})$ avec T_{end} la fin de l'horizon temporel et P_{mp} le temps en nombre de périodes pour traverser complètement le pipeline principal sans maintenance. L'algorithme retourne une solution partiellement évaluée (ligne 15).

Algorithme 4.5. Transport_time_proc

```
1.  Input
2.     Inst: instance principalement composée des éléments suivants utilisés ici:
3.       .id_SO: l'identifiant de l'opération d'arrêt
4.       .PF: la quantité chargée dans pipeline pl pendant une période t
5.       .PV: l'ensemble des volumes totaux des pipelines
6.     Plan: un plan d'ordonnancement
7.       .PD: la matrice des décisions de chargement pour le pipeline pl à t
8.     pl: le pipeline considéré
9.     Mode: = 1 pour la détermination de la période de chargement,
10.          = 2 pour la détermination de la période de déchargement
11. Output
12.    SPT: un vecteur des périodes de chargement ou de déchargement selon le Mode
13. Begin
14.    For t = Inst.T_start to Inst.T_end where Plan.PD[pl,t] != Inst.id_SO  Do
15.       t' <- t
16.       v <- Inst.PF[pl]
17.       While (Mode=1 and t'>=Inst.T_1)or(Mode=2 and t'<=(Inst.T_end+Inst.P_mp) Do
18.          If Plan.PD[pl,t'] != Inst.id_SO Then
19.             //Le pipeline pl n'est pas en arrêt t'
20.             If v = Inst.PV[pl] Then
21.                SPT[t] <- t'+1
22.                Break
23.             End If
24.             v <- v + Inst.PF[pl]
25.          End If
26.          If Mode = 1 then
27.             t' <- t' - 1   // pour la détermination de la période de chargement
28.          Else
29.             t' <- t' + 1   // pour la détermination de la période de déchargement
30.          End if
31.       End While
32.    End For
33.    Return SPT
34. End
```

L'algorithme 4.5 décrit la détermination des périodes de chargement/déchargement correspondantes pour un pipeline pl qui est connecté à la station de tête. L'algorithme fonctionne en deux modes : mode 1 pour déterminer les périodes de chargement d'un pipeline secondaire aux laveries et mode 2 pour déterminer les périodes de déchargement du pipeline principal à la station terminale. Pour chaque période d'ordonnancement t de T_{start} à T_{end}, avec la station de tête comme point de référence spatial (lignes 14-33), une variable locale t' est introduite pour calculer la période relative de chargement/déchargement à l'autre extrémité du pipeline pl (ligne 15). Une boucle WHILE est utilisée pour estimer le temps total de parcours (en nombre de périodes) pour traverser le pipeline pl considéré (lignes 17-31). Une variable locale v est introduite pour identifier la position (en termes de volume cumulé) à la période t' dans le pipeline pl (ligne 16), et elle est incrémentée par le volume transporté par période (ligne 24). En cas d'arrêt durant une période donnée (ligne 18), la valeur de v ne change pas. Un lot traverse le pipeline considéré uniquement lorsque le volume cumulé atteint le volume du pipeline (lignes 20-23) et l'axe de la période d'ordonnancement associé de l'autre côté du pipeline pl est alors identifié (ligne 26). L'algorithme renvoie l'ensemble des périodes d'ordonnancement correspondantes (ligne 33).

L'algorithme 4.6 est conçu pour mettre à jour le niveau de stockage et le numéro du produit stocké de chaque bac pour chaque période t de T_{start} à T_{end}. Le niveau de stockage et le numéro du produit stocké sont maintenus dans les matrices Sq et Sp d'une solution évaluée. Les deux matrices sont initialisées avec la quantité et la qualité stockées à la période $(T_{start} - 1)$ (lignes 17-20) avant d'être mises à jour pour chaque période t de T_{start} à T_{end} (lignes 22-30).

Le niveau de stockage des bacs est mis à jour en tenant compte des variables de décision relatives aux opérations de chargement et de déchargement à la période t et du niveau de stockage précédent à $t - 1$, assurant la conformité avec les contraintes de conservation de la quantité (ligne 25). Il est important de noter que les matrices SCq et SDq contiennent le volume des opérations de chargement et de déchargement correspondantes pour chaque bac de stockage s à chaque période t. L'algorithme vérifie

également la satisfaction des contraintes de stockage (lignes 26-28). La solution mise à jour est renvoyée à la fin de l'algorithme (ligne 31).

Algorithme 4.6. Storage_update

```
1.   Input
2.     Inst: une instance du problème avec les éléments suivants utilisés ici:
3.       .S: l'ensemble des bacs de stockage
4.       .Smax: la capacité du bac de stockage s
5.       .TSp: l'ensemble des produits initialement en stockage pour le bac s
6.       .TSq: l'ensemble des quantités initiales dans les bacs s à (T_start -1)
7.     Plan: un plan d'ordonnancement, avec les éléments suivants utilisés ici:
8.       .SCq: la matrice des quantités chargées depuis le bac s à la période t
9.       .SDq: la matrice des quantités déchargées vers le bac s à la période t
10.    Sol: une solution évaluée, avec les éléments suivants utilisés ici:
11.      .Sp: la matrice des identifiants de produits en stockage en bac s à t
12.      .Sq: la matrice des quantités en stockage pour le bac s à t
13.      .scv: = true si la contrainte de stockage est violée
14. Output
15.    Sol: une solution évaluée
16. Begin
17.    For each s in Inst.S Do
18.       Sol.Sp[s,T_start - 1] <- Inst.TSp[s]
19.       Sol.Sq[s,T_start - 1] <- Inst.TSq[s]
20.    End For
21.    Sol.scv <- false
22.    For t = Inst.T_start  To Inst.T_end Do
23.       For each s in Inst.S Do
24.          Sol.Sp[s,t] <- Updating the stored product
25.          Sol.Sq[s,t] <- Sol.Sq[s,t-1]- Plan.SCq[s,t] + Plan.SDq[s,t]
26.          If Sol Sol.Sq[s,t] < 0 or Sol.Sq[s,t] > Inst.Smax[s] then
27.             Sol.scv <- true
28.          End if
29.       End For
30.    End For
31.    Return Sol
32. End
```

2.2. Ordonnancement du produit local

Étant donné le fait qu'il existe une différence entre l'ordonnancement du produit dominant (le produit local) et les autres produits (produits d'exportation), différentes stratégies d'ordonnancement sont adoptées. Le produit local est prioritaire dans l'ordonnancement en raison de son débit de consommation continu et de sa demande relativement élevée. Par conséquent, le produit local est planifié en premier, jusqu'à la fin de l'horizon d'ordonnancement. L'objectif est de satisfaire sa demande et de maximiser la durée entre les lots successifs du produit local en utilisant l'opération de transfert entre *TSL* et *TST*. Une fois l'ordonnancement du produit local terminé, les autres produits peuvent être planifiés en fonction d'un ordre de priorité prédéfini.

Algorithme 4.7. Local_product_scheduling

```
1.  Input
2.     Inst: une instance, avec les éléments suivants utilisés ici:
3.       .WP: matrice de priorité de production pour le produit p à la laverie w
4.       .BS: nombre minimum de périodes pour un lot de produit p dans pipeline pl
5.       .WT: ensemble des types de laveries
6.     Plan: un plan d'ordonnancement, avec les éléments suivants utilisés ici:
7.       .WD: matrice des décisions de production pour les laveries w à t
8.       .PD: matrice des décisions de chargement pour les pipelines pl à t
9.     Sol: une solution évaluée, avec les éléments suivants utilisés ici:
10.      .Sq: matrice de la quantité stockée pour les bacs s à la période t
11.      .PT: période de chargement/déchargement correspondante pour pl à t
12. Output
13.    Plan: un plan d'ordonnancement
14. Begin
15.    For t = Inst.Tstart to Inst.Tend Do
16.       WSset <- WS_selection_for_P1(Inst, plan, Sol, t)
17.       For i = 1 in |WSset| Do
18.          w <- WSset[i]
19.          t" <- Sol.PT[w,t]
20.          t_prec <- Sol.PT[w,t-1]
21.          If not (t" > 0 and Plan.PD[w,t"] = 0) then
22.             Continue   //le pipeline secondaire n'est pas disponible à t"
23.          End if
24.          If Plan.PD[w,t_prec] = 0 Then
25.          //stratégie 1: création d'un nouveau lot dans pipeline secondaire w
26.             Plan" <- Plan
27.             Sol" <- Sol
28.             For j = t to (t + Inst.BS[1,w]) Do
29.             //Test de simulation pour création d'un nouveau lot dans w
30.                {Plan",Sol"}<-WS_scheduling(Inst,Plan",Sol",w,1,j)
31.                {Plan",Sol"}<-Pipeline_scheduling(Inst,plan",
32.                                Sol",Inst.id_MP,1,j)
33.                {Plan",Sol"}<-DTSP_scheduling(Inst,plan",Sol",
34.                                Sol".PT[Inst.id_MP,t])
35.             End For
36.             If Sol".scv = true Then //contraintes de stockage violées dans Sol"
37.                //Un nouveau lot n'est pas possible pour pipeline secondaire w
38.                Continue
39.             End if
40.             //Un nouveau lot est possible pour pipeline secondaire w
41.             For j = t to (t + Inst.BS[1,w]) Do
42.                {Plan,Sol} <- WS_scheduling(Inst,Plan,Sol,w,1,j)
43.             End For
44.          Else If Sol.PD[w,t_prec] = 1 and Inst.WT[w] != 1 Then
45.             //stratégie 2: ajout de l'opération de chargement dans lot existant
46.             {Plan, Sol} <- WS_Scheduling(Inst, Plan, Sol, w, 1, t)
47.          End If
48.       End For
49.       {Plan, Sol} <- Pipeline_scheduling(Inst, plan, Sol, Inst.id_MP, 1, t)
50.       {Plan, Sol} <- DTSP_scheduling(Inst, plan, Sol, Sol.PT[Inst.id_MP,t])
51.    End For
52.    Return {Plan, Sol}
53. End
```

L'algorithme 4.7 décrit la procédure d'ordonnancement du produit local aux laveries, aux pipelines secondaires et au pipeline principal. L'algorithme planifie les opérations de production et de transport de T_{start} à T_{end}. Il est important de noter que

les opérations de chargement prévues pour le pipeline principal sur les périodes de $(T_{end} - P_{mp})$ à T_{end} ne seront pas déchargées à la station terminale avant la fin de l'horizon d'ordonnancement T_{end}, où P_{mp} représente le nombre de périodes nécessaires pour qu'un lot traverse le pipeline principal en l'absence de maintenance.

À chaque période t à la station de tête, un ensemble de laveries disponibles pour la production du produit local est sélectionné (ligne 16) en utilisant l'algorithme *WS_selection_for_P1*. Ce dernier sélectionne le mode de production des laveries en fonction de l'état du bac de transfert TST à la période $PT[id_MP, t]$. Les laveries sélectionnées sont triées par ordre décroissant de priorité de production et conservées dans l'ensemble *WSset*.

Pour chaque laverie disponible *w* présente dans l'ensemble *WSset*, il existe deux stratégies d'ordonnancement en fonction de la décision relative au pipeline secondaire à $PT[w, t-1]$ (lignes 17-48) : la première stratégie consiste à planifier un nouveau lot dans le pipeline secondaire à partir de la période $PT[w, t]$ en utilisant un test de simulation (lignes 24-43) ; la seconde stratégie consiste à ajouter l'opération de chargement à la période $PT[w, t]$ à un lot existant du pipeline secondaire (lignes 44-47). L'ordonnancement des laveries utilise l'algorithme *WS_scheduling*, qui prend en compte la décision de transport (opération de chargement pour le pipeline secondaire) à la période $PT[w, t]$ et les décisions de production (activités de production à la laverie).

Le test de simulation commence par la duplication du plan d'ordonnancement actuel et de la solution évaluée (lignes 26-27). La taille minimale du nouveau lot contenant le produit local dans le pipeline secondaire *w* est définie par le nombre de périodes $BS[1, w]$. Pour chaque période *j* de t à $(t + BS[1, w])$, le test de simulation implique le lancement des algorithmes *WS_scheduling*, *Pipeline_scheduling* et *DTSP_scheduling* pour l'ordonnancement respectif de la laverie w et de son pipeline secondaire correspondant, du pipeline principal et des pipelines secondaires de transfert (lignes 28-35).

Le résultat du test de simulation est stocké dans la copie du plan d'ordonnancement (noté $plan$"). Si le nouveau lot dans le pipeline secondaire w ne peut pas être planifié sur les périodes de t à $(t + BS[1,w])$, l'algorithme passe à la laverie suivante dans *WSset* (lignes 36-39). Cela est principalement dû à des violations de contraintes (liées à la taille de lot ou à la capacité de stockage). Si l'ordonnancement du nouveau lot est possible, l'algorithme applique *WS_scheduling* au plan d'ordonnancement actuel (noté $Plan$) sur les périodes de t à $t + BS[1,w]$) pour valider le test de simulation (lignes 41-43).

La deuxième stratégie d'ordonnancement pour la laverie w est appliquée si l'opération de chargement à la période $PT[w,t]$ dans le pipeline secondaire concerne le produit local et si la laverie n'est pas de type 1 (ligne 44). Les différents types de laveries sont présentés dans la section 2.2.2.

Après avoir planifié toutes les laveries disponibles dans *WSset*, les algorithmes *Pipeline_scheduling* et *DTSP_scheduling* sont lancés pour l'ordonnancement du pipeline principal et des pipelines secondaires à la station terminale (lignes 49-50). L'algorithme *Local_product_scheduling* renvoie le plan d'ordonnancement actuel et la solution évaluée (ligne 52).

2.2.1. Sélection des laveries pour le produit local

L'algorithme 4.8 illustre la sélection des laveries pour la production du produit local à la période t. Nous distinguons deux modes de production (décrits par la variable pm) en fonction du niveau de stockage du bac TST à la période t' (lignes 21-23) : $pm = 1$ si le niveau de stockage de TST est inférieur à la valeur critique prédéfinie $TSTc$; $pm = 0$ sinon. La sélection des laveries dépend du mode de production : pour $pm = 1$, le débit de production total des laveries sélectionnées aux périodes t" doit être supérieur au débit de demande pendant la période de déchargement relative t' à la station terminale : la somme de $WF[1,w]$ pour w dans $WSset$ doit être inférieure ou égale à $LD[t']$, où $WF[1,w]$ est la quantité de production par période pour les laveries w, et $LD[t']$ est la quantité demandée du produit local à la période t'. Sinon, pour $m = 0$, le taux de production total des laveries doit être inférieur mais proche de la demande

pour le produit local à la période t'. Cette règle garantit que pour la laverie w ayant la plus basse priorité de production du produit local ($WP[1,w]$), le temps entre un arrêt et une remise en marche est maximisé, vu que l'opération de transfert assure la satisfaction du produit local lorsque la laverie n'est pas utilisée. Le deuxième mode de production nous permet de créer une fenêtre temporelle relativement grande pour planifier les produits d'export dans les laveries.

Algorithme 4.8. WS_selection_for_P1

```
1.  Input
2.     Inst: une instance, avec les éléments suivants utilisés ici :
3.       .id_MP: l'identifient du pipeline principal
4.       .id_TST: l'identifient du bac de stockage TST
5.       .TST_c: la valeur prédéfinie du niveau critique de stockage pour TST
6.       .LD: la quantité demandée pour le produit local P1 à chaque période t
7.       .W: l'ensemble des laveries
8.       .WP: matrice de priorité de production pour le produit p à la laverie w
9.       .WF: la matrice de quantité de production pour le produit p à w à t
10.    Plan: un plan de production, avec les éléments suivants utilisés ici:
11.      .WD: matrice des décisions de production pour la laverie w à t
12.    Sol: une solution évaluée, avec les éléments suivants utilisés ici:
13.      .Sq: la matrice de la quantité stockée pour les bacs s à la période t
14.      .PT: la période de chargement/déchargement correspondante pour pl à t
15.    t: une période
16. Output
17.    WSset: un ensemble de laveries disponibles pour le produit local
18. Begin
19.    t' <- Sol.PT[Inst.id_MP,t]
20.    pm <- 0
21.    If Sol.Sq[Inst.id_TST,t'] < Inst.TST_c then
22.       pm <- 1
23.    End if
24.    v <- 0
25.    WSset <- {}
26.    WS <- Sort elements w of Inst.W in descending order according Inst.WP[1,w]
27.    While v < Inst.LD[t'] or WS = Ø
28.       w <- WS[1]
29.       t" <- Sol.PT[w,t]
30.       If Plan.WD[w,t"] = 0 then  // la laverie est disponible
31.          If pm = 1 or (pm = 0 and (v + Inst.WF[1,w]) < Inst.LD[t']) then
32.             WSset <- WSset U w
33.             v <- v + Inst.WF[1,w]
34.          End if
35.       Else if Plan.WD[w,t"] = 1 then // la laverie est planifiée pour P1
36.          v <- v + Inst.WF[1,w]
37.       End if
38.       WS <- WS \ w    // retirer la laverie de l'ensemble actuel
39.    End While
40.    Return WSset
41. End
```

Dans l'algorithme 4.8, l'ensemble des laveries est d'abord trié par ordre décroissant selon la priorité de production du produit local (ligne 26). Les laveries sont sélectionnées de manière itérative une par une à l'aide d'une boucle While (lignes 27-

39): la première laverie dans l'ensemble trié est sélectionnée (ligne 28). En cas de disponibilité de la laverie w à t", elle est ajoutée à $WSset$ lorsque $pm = 1$, ou lorsque $pm = 0$ si le taux de production total est inférieur à la demande de produit local à la période t' (lignes 30-34). Si la laverie sélectionnée w est déjà planifiée pour le produit local, le taux de production est inclus dans le taux de production total (lignes 35-37). À la fin de chaque itération, la laverie sélectionnée est exclue de l'ensemble trié WS. La boucle s'arrête lorsque le taux de production total atteint la demande de produit local à la période t' ou que l'ensemble trié WS est vide (ligne 27). L'algorithme retourne l'ensemble des laveries sélectionnées (ligne 40).

2.2.2. Ordonnancement des laveries et des pipelines secondaires

WS_Scheduling est détaillé dans l'algorithme 4.9 qui permet l'ordonnancement d'une laverie w et de son pipeline secondaire relatif pendant la période t. En fonction de la différence entre les débits de production d'une laverie, le débit de transport de son pipeline secondaire relatif, et la présence d'un bac de stockage intermédiaire, une stratégie d'ordonnancement différente est adoptée pour chaque type de laverie. L'algorithme détermine la décision de transport (opération de chargement) avant les décisions de production pour chaque laverie. Il est important de noter qu'une opération d'arrêt (avec id_SO) peut être planifiée pour une décision de transport ou pour une décision de production d'une laverie w à la période t' ($PD[w,t'] = id_SO$ ou $WD[w,t'] = id_SO$).

L'ordonnancement d'un pipeline secondaire w à la période t est possible s'il est disponible (ligne 17). Une copie des décisions de transport actuelles PD[w] est stockée dans l'ensemble V (ligne 18), qui est ensuite utilisée pour comparaison avec les nouvelles décisions de transport (lignes 23-31) après l'ordonnancement du pipeline secondaire (ligne 20) et de la laverie (ligne 22). En cas de changements dans les périodes d'arrêt (lignes 25-29), les périodes de chargement correspondantes pour le pipeline secondaire w sont recalculées (ligne 27). De plus, l'algorithme *Storage_update* est exécuté pour recalculer le niveau de stockage des bacs en fonction des nouvelles valeurs des variables de décision dans le plan d'ordonnancement actuel (ligne 32).

L'algorithme retourne le plan d'ordonnancement actuel et la solution évaluée (ligne 34).

L'algorithme *Pipeline_scheduling* est appliqué pour l'ordonnancement de l'opération de chargement dans un pipeline. Cet algorithme est partagé entre l'ordonnancement des pipelines secondaires et celui du pipeline principal. Il sera détaillé dans la section suivante.

Algorithme 4.9. WS_scheduling

```
1.  Input
2.     Inst: une instance, avec les éléments suivants utilisés ici:
3.       .id_SO: l'identifiant de l'opération d'arrêt
4.     Plan: un plan de production, avec les éléments suivants utilisés ici:
5.       .WD: matrice des décisions de production pour la laverie w à t
6.       .PD: matrice des décisions de chargement pour le pipeline pl à t
7.     Sol: une solution évaluée, avec les éléments suivants utilisés ici:
8.       .PT: période de chargement/déchargement correspondante pour pl à t
9.     w: une laverie
10.    p: un produit
11.    t: une période
12. Output
13.    Plan: un plan d'ordonnancement
14.    Sol: une solution évaluée
15. Begin
16.    t' = Sol.PT[w,t]  //période de chargement relative à une déchargement à t
17.    If Plan.PD[w,t'] = 0 Then   // le pipeline secondaire est disponible à t'
18.       V <- Sol.PD[w]
19.       //planifier le pipeline secondaire
20.       Plan <- Pipeline_scheduling(Inst,Plan,Sol,w,p,t')
21.       //planifier la laverie
22.       Plan.WD[w] <- Schedule the washing station w at t'
23.       For t'' = Inst.T_start to Inst.T_end Do
24.          If Plan.PD[w,t''] = Inst.id_SO or V[t''] = Inst.id_SO Then
25.             If Plan.PD[w,t''] != V[t''] Then
26.                //changement des périodes d'arrêt
27.                Sol.PT[w] <- Transport_time_proc(Inst,plan,w,1)
28.                Break
29.             End If
30.          End If
31.       End For
32.       Sol <- Storage_update(Inst, Plan, Sol)
33.    End If
34.    Return {Plan, Sol}
35. End
```

L'ordonnancement de la laverie w (ligne 22) vise à prendre la décision de production à la période t' pour assurer la possibilité d'exécuter l'opération de chargement dans son pipeline secondaire relatif à la même période. L'ordonnancement adopte une stratégie spécifique pour les décisions de production en fonction du type de laverie. Il existe trois types de laveries distinguées par la valeur de $WT[w]$: le type 1 a un taux de transport supérieur au taux de production, le type 2 a un taux de transport

inférieur au taux de production, et le type 3 avec des taux de transport et de production égaux (aucun bac de stockage intermédiaire n'est nécessaire). Les laveries considérées sont les suivantes : W_1 est de type 1, W_2 est de type 2, et W_3 et W_4 sont de type 3.

Une laverie de type 1 (avec $WT[w] = 1$) dispose d'un bac de stockage désigné par S_w. Ce dernier doit atteindre un certain niveau de stockage (prédéfini comme $Smin[w]$) avant de commencer l'opération de chargement d'un nouveau lot dans son pipeline secondaire relatif. Étant donné que le débit de transport est supérieur au débit de production, $Smin[w]$ garantit le respect de la contrainte de taille minimale de lot dans le pipeline secondaire. Pour un produit p, la valeur de $Smin[w]$ dépend du débit de production $WF[p,w]$, du débit de transport du pipeline secondaire relatif $PF[w]$, et de la durée minimale d'ordonnancement de lot $SPmin[p,w]$: $Smin[w] = (1 - \frac{WF[p,w]}{PF[w]}) \times SPmin[p,w]$.

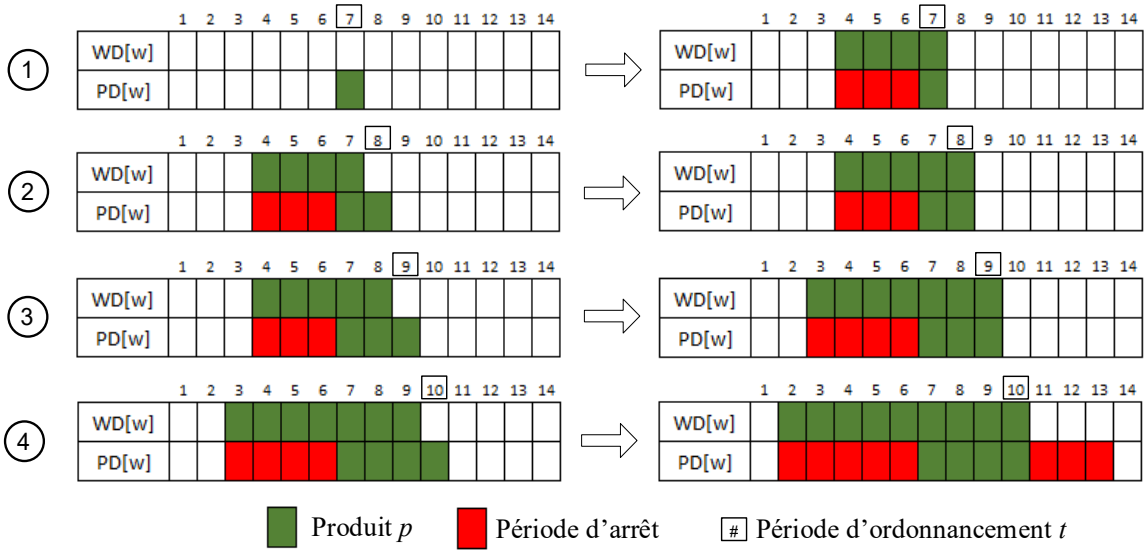


Figure 4.2. Exemple d'ordonnancement d'une laverie w de type 1

La Figure 4.2 illustre en 4 étapes l'ordonnancement d'une laverie w de type 1. Dans cet exemple, atteindre la valeur de $Smin[w]$ dans le bac S_w nécessite la production du produit p à la laverie w sur plusieurs périodes (définies par $BS[p,w]$). Pour chaque étape, les décisions de transport et de production sont présentées respectivement dans les première et deuxième colonnes. Comme illustré dans la Figure 4.2, il est possible de planifier un nouveau lot de produit p dans le pipeline secondaire

de taille $Smin[w]$, en commençant à t si le pipeline secondaire relatif est disponible (c'est-à-dire $PD[w,t] = 0$) sur 2 périodes dans cet exemple de t à $(t+1)$, et le produit p n'est pas planifié à $(t-1)$ (c'est-à-dire $PD[w,t-1] \neq p$).

Comme montré à l'étape 1 de la Figure 4.2, nous commençons l'ordonnancement de l'opération de chargement à la période $t = 7$, et le niveau de stockage du bac relatif n'est pas suffisant pour créer un nouveau lot avec une taille minimale de 2 périodes (le bac est vide dans cet exemple). Comme montré à l'étape 1, une opération de chargement est planifiée à la période 7 (première colonne de l'étape 1) nécessitant plusieurs activités de production avant la période 7 pour atteindre la quantité $Smin[w]$ dans le bac S_w. Dans cet exemple, des décisions de production sont prises de la période 4 à 7 (deuxième colonne de l'étape 1). Le pipeline secondaire est en arrêt pour les périodes t' de 4 à 6: $PD[w,t'] = id_SO$, où id_SO est l'identifiant de l'opération d'arrêt.

Comme illustré à l'étape 2 de la Figure 4.2, une seule décision de production est prise à la période 8 lorsque le niveau de stockage du bac est suffisant pour garantir l'opération de chargement à la même période (c'est-à-dire $Sq[w,t] \geq PF[w]$). Sinon, si le niveau de stockage est inférieur à la quantité de chargement du pipeline secondaire à la période t ($Sq[w,t] < PF[w]$), comme illustré à l'étape 3 de la Figure 4.2, de nouvelles décisions de production peuvent être ajoutées pour les périodes t' antérieures à la période 4. Dans cet exemple, une nouvelle décision de production est ajoutée à la période 3.

Après la dernière opération de chargement d'un lot (limitée par la taille maximale du lot), une durée d'arrêt du pipeline secondaire sera planifiée dans la laverie w de type 1. La durée est équivalente au temps nécessaire pour que le bac S_w se remplisse jusqu'à $Smin[w]$. Comme montré dans la deuxième colonne de l'étape 4, lorsque l'ordonnancement du lot se termine à $t = 10$, une durée d'arrêt est planifiée sur les périodes de 11 à 13. L'objectif est d'envoyer les plus gros lots possibles et de toujours finir avec un niveau de stockage dans S_w proche de 0. Ainsi, S_w peut accepter un nouveau produit de qualité différente.

Pour une laverie w de type 2 (avec $WT[w] = 2$), où le taux de transport est inférieur au taux de production, l'arrêt de la laverie pour les activités de production à la période t (avec $WD[w,t] = id_SO$) se produit lorsque le bac S_w atteint son niveau maximal à la période $(t-1)$. L'arrêt de la laverie w continue pour un nombre connu de périodes $WT2S$ avant la possibilité de prendre une nouvelle décision de production à la période $(t + WT2S)$: $WD[w, t + WT2S] = p$. De plus, la décision de transport est possible pendant les périodes d'arrêt t' dans la laverie si le niveau de stockage est supérieur à la quantité de chargement du pipeline secondaire relatif (c'est-à-dire $Sq[w,t'] \geq PF[w]$).

Enfin, pour une laverie w de type 3 (avec $WT[w] = 3$), ayant des taux de transport et de production égaux, les décisions sont synchronisées à la période t avec $PD[w,t] = WD[w,t]$ pour tous les cas, sauf lorsqu'une quantité minimale de séparation d'eau est planifiée dans le pipeline secondaire, un arrêt est planifié dans la laverie. En cas de possibilité de violation de contrainte, la laverie et son pipeline secondaire relatif sont arrêtés.

Veuillez noter que la procédure d'ordonnancement de la laverie vérifie toujours si les décisions prises respectent les contraintes de capacité de stockage. En cas de violation des contraintes de stockage, les décisions d'ordonnancement seront annulées. En cas de changement de qualité dans un pipeline secondaire, un lot minimal de séparation d'eau est planifié pour séparer les différents produits.

2.2.3. Ordonnancement des opérations dans les pipelines

L'ordonnancement des opérations de chargement dans les pipelines secondaires ou dans le pipeline principal utilise l'algorithme *Pipeline_scheduling*. Comme indiqué dans l'algorithme 4.10, l'ordonnancement d'une opération de chargement (décision de transport) du produit p à la période t dans le pipeline pl est possible si le pipeline est disponible (ligne 22). L'opération de chargement du produit p peut être organisée comme suit:

- L'opération de chargement à la période t peut être ajoutée à un lot existant (lignes 24-37) si l'opération de chargement précédente concerne le même produit (ligne 24) et si la contrainte de taille maximale du lot est respectée, les bacs d'origine et de destination respectent les limites de stockage maximales et minimales en prenant en compte l'opération de chargement dans le pipeline pl à la période t (lignes 32-34). Il convient de noter que la contrainte sur le niveau de stockage d'origine est relaxée pour SP_3 et SP_4, vu que les activités de production sont synchronisées avec la décision de transport sans l'utilisation d'un bac de stockage. La mise à jour du lot est assurée par l'algorithme *PL_batch_updating* (ligne 36). Les bacs d'origine et de destination sont sélectionnés en fonction de la nature du lot transporté. Par exemple, pour le produit local dans le pipeline principal, le bac d'origine est HSL et le bac de destination est soit $TSL\ ou\ TST$. L'un des bacs de destination est sélectionné. TSL est choisi par défaut, sauf lorsque TST atteint la valeur critique $TSTc$.
- Un nouveau lot de produit p est planifié dans le pipeline pl à la période t (ligne 40) si le produit chargé précédemment dans le pipeline est compatible avec p (ligne 38). Sinon, un nouveau lot d'eau doit être créé comme lot séparateur à la période t (ligne 43). L'ordonnancement d'un nouveau lot utilise l'algorithme *PL_new_batch_scheduling*. L'algorithme renvoie le plan d'ordonnancement et la solution évaluée après la mise à jour des niveaux de stockage de tous les bacs en utilisant l'algorithme *Storage_update* (lignes 46-47).

L'algorithme 4.11 présente le processus de mise à jour de l'ordonnancement des opérations de chargement dans le pipeline pl à la période t. La taille du lot et le numéro du lot correspondant à l'opération de chargement à la période t sont mis à jour. La quantité chargée depuis le bac source à la période t et la quantité à décharger au bac de destination à la période t' seront stockées dans le plan d'ordonnancement actuel (lignes 19-32). Dans le cas des pipelines SP_3 et SP_4, la décision de production pour la laverie relative est également prise (ligne 27). Enfin, l'opération de déchargement pour les lots initiaux est prise en compte dans cet algorithme (lignes 32-39). Le début des opérations de chargement des lots initiaux présents dans le pipeline est exécuté avant T_{start}, et les

opérations de déchargement relatives sont effectuées juste après T_{start}. À la fin, l'algorithme renvoie le plan de production actuel (ligne 40).

Algorithme 4.10. Pipeline_scheduling

```
1.  Input
2.     Inst: une instance, avec les éléments suivants utilisés ici:
3.       .Id_water: l'identifiant de l'eau
4.       .PF: la quantité chargée dans le pipeline pl pendant une période t
5.       .Smax: la capacité du bac de stockage s
6.       .BQmax: la taille maximale d'un lot de produit p dans le pipeline pl
7.       .MC: matrice de compatibilité entre deux produits successifs p et q
8.     Plan: un plan d'ordonnancement, avec les éléments suivants utilisés ici:
9.       .WD: matrice des décisions de production pour la laverie w
10.      .PD: matrice des décisions de chargement pour le pipeline pl à t
11.      .BO: ensemble des lots planifiés dans le pipeline pl
12.      .BnC: numéro du lot planifié dans le pipeline pl chargé à t
13.    Sol: une solution évaluée, avec les éléments suivants utilisés ici:
14.      .Sq: matrice des quantités de stockage dans le bacs s à la période t
15.    pl: un pipeline
16.    p: un produit
17.    r: une période de chargement
18. Output
19.    Plan: un plan d'ordonnancement
20.    Sol: une solution évaluée
21. Begin
22.    If Plan.PD[lp,t] = 0 Then  //le pipeline est disponible à t
23.       t_prec <- période de chargement précédente dans le pipeline pl
24.       If Plan.PD[pl,t_prec] = p Then //même produit
25.           id_b <- Plan.BnC[pl,t_prec] //id du lot pour l'opération précédente
26.           batch <- Plan.BO[pl,id_b]
27.           s1 <- batch.s_tank     //bac source
28.           s2 <- batch.d_tank     //bac de destination
29.           PTG <- Transport_time_proc(Inst,plan,pl,2)
30.           t'<- PTG[t]
31.           v <- Inst.PF[pl]
32.           If batch.size + v <= Inst.BQmax[p,Inst.MP] and ((pl ∉ {3,4} and
33.           Sol.Sq[s1,t] >= v) or (pl ∈ {3,4} and Plan.WD[pl,t] = 0)) and
34.           Sol.Sq[s2,t'] + v <= Inst.Smax[s2] Then
35.              //modifier un lot existant
36.              Plan <- PL_batch_updating(Inst,Plan,Sol,pl,p,t,id_b)
37.           End If
38.       Else If Inst.MC[p,Plan.PD[pl,t_prec]] = 1 Then
39.          //p est compatible avec le produit précédent
40.          Plan <- PL_new_batch_scheduling(Inst,Plan,Sol,pl,p,t)
41.       Else
42.          //nouveau lot d'eau en cas de non-compatibilité entre les produits
43.          Plan <- PL_new_batch_scheduling(Inst,Plan,Sol,pl,Inst.Id_water,t)
44.       End If
45.    End If
46.    Sol <- Storage_update(Inst, Plan, Sol)
47.    Return {Plan, Sol}
48. End
```

Algorithme 4.11. PL_batch_updating

```
1.  Input
2.     Inst: une instance, avec les éléments suivants utilisés ici:
3.       .PF: la quantité chargée dans le pipeline pl pendant une période t
4.     Plan: un plan d'ordonnancement, avec les éléments suivants utilisés ici:
5.       .PD: matrice des décisions de chargement pour le pipeline pl à t
6.       .WD: matrice des décisions de production pour la laverie w à la période t
7.       .BO: ensemble des lots planifiés dans le pipeline pl
8.       .BnC: numéro du lot planifié dans le pipeline pl chargé à t
9.       .SCq: matrice de la quantité chargée du bac s à la période t
10.      .SDq: matrice de la quantité déchargée dans le bac s à la période t
11.    Sol: une solution évaluée, avec les éléments suivants utilisés ici:
12.    pl: un pipeline
13.    p: un produit
14.    t: une période de chargement
15.    id_b: un numéro de lot
16. Output
17.    Plan: un plan d'ordonnancement
18. Begin
19.    v <- Inst.PF[pl]
20.    batch <- Plan.BO[pl,id_b]
21.    batch.size <- batch.size + v
22.    Plan.BnC[pl,t] <- id_b
23.    Plan.PD[lp,t] <- p
24.    If pl ∉ {3,4} Then
25.       Plan.SCq[batch.s_tank,t] <- v // opération de chargement à t
26.    Else
27.       Plan.WD[pl,t] <- p
28.    End If
29.    PTG'<- Transport_time_proc(Inst,plan,pl,2)
30.    t'<- PTG'[t]
31.    Plan.SDq[batch.d_tank, t'] <- v            //opération de déchargement à t'
32.    //lot d'initialisation
33.    PTG" <- Transport_time_proc(Inst,plan,pl,1)
34.    t" <- PTG"[t]
35.          //Identifier la période de chargement pour le lot déchargé pendant t
36.    If t" < Inst.T_start Then
37.        batch <- Plan.BO[pl, Plan.BnC[pl,t"]]
38.        Plan.SDq[batch.d_tank,t] <- v         //opération de déchargement à t
39.    End If
40.    Return Plan
41. End
```

L'algorithme *PL_new_batch_scheduling* est appliqué pour l'ordonnancement d'un nouveau lot dans le pipeline pl. Comme illustré dans l'algorithme 4.12, nous commençons par la sélection des bacs de stockage d'origine et de destination relatifs, en tenant compte du niveau de stockage à la période t pour $s1$, et de la capacité résiduelle à la période t' pour $s2$. L'objectif est de garantir l'ordonnancement d'un lot de taille minimale du produit p dans le pipeline pl (lignes 19-20) sans violer aucune contrainte de stockage. Veuillez noter que des bacs source et destination fictifs sont introduits pour l'eau. La contrainte de taille minimale du lot est vérifiée en contrôlant l'existence de périodes continues disponibles pour les opérations de chargement à partir de t (ligne 21). Un nouveau lot de produit p est ensuite créé avec une taille de 0 (ligne

24) et est conservé dans le plan d'ordonnancement actuel pendant la période de chargement t. L'algorithme *PL_batch_updating* est ensuite appliqué pour ajuster la taille du lot et effectuer d'autres opérations relatives à l'ordonnancement de l'opération de chargement.

Algorithme 4.12. PL_new_batch_scheduling

```
1.  Input
2.     Inst: une instance, avec les éléments suivants utilisés ici:
3.       .Id_water: l'identifiant de l'eau
4.       .PF: la quantité chargée dans le pipeline pl pendant une période t
5.     Plan: un plan d'ordonnancement, avec les éléments suivants utilisés ici:
6.       .PD: matrice des décisions de chargement pour le pipeline pl à t
7.       .BO: ensemble des lots planifiés dans le pipeline pl
8.       .BnC: numéro du lot planifié dans le pipeline pl chargé à t
9.     Sol: une solution évaluée, avec les éléments suivants utilisés ici:
10.    pl: un pipeline
11.    p: un produit
12.    t: une période de chargement
13. Output
14.    Plan: un plan d'ordonnancement
15. Begin
16.    v <- Inst.PF[pl]
17.    PTG <- Transport_time_proc(Inst,plan,pl,2)
18.    t'<- PTG[t]
19.    s1 <- Sélectionner le bac source pour le produit p à t
20.    s2 <- Sélectionner le bac de destination pour le produit p à t'
21.    cp <- Vérifier la possibilité d'un nouveau lot de p dans pl à partir de t
22.    If p = Inst.Id_water or (s1 != 0 and s2 != 0 and cp = true) Then
23.       id_b <- |Plan.BO[pl]| + 1   // Nouveau numéro de lot
24.       batch <- New batch(num:=b,prod:=p,size:=0,s_tank:=s1,d_tank:=s2,ct:=t)
25.       Plan.BO[pl] <- Plan.BO[pl] U batch
26.       Plan.BnC[pl,t] <- id_b
27.       Plan <- PL_batch_updating(Inst,Plan,Sol,pl,p,t,id_b)
28.    End if
29.    Return Plan
30. End
```

2.2.4. Ordonnancement des pipelines à la station terminale

Comme illustré dans l'algorithme 4.13, l'ordonnancement des pipelines secondaires de livraison et de transfert à la station terminale se fait en deux étapes : la première étape concerne l'ordonnancement du pipeline de livraison (SP_5) (lignes 24-27), et la deuxième étape concerne l'ordonnancement du pipeline de transfert (SP_6) (lignes 29-39). Les deux pipelines sont dédiés au transport du produit local. Le pipeline de livraison doit fonctionner en mode continu sans aucun arrêt. Le niveau de stock du bac *TSL* est vérifié uniquement après avoir appliqué l'algorithme *Storage_update*. Il est important de noter que le débit du pipeline de livraison n'est pas une valeur constante ; sa valeur à la période t dépend de la quantité demandée par le client local $LD[t]$.

Le pipeline de transfert peut être activé à la période t uniquement si le pipeline principal décharge de l'eau ou un produit d'export à la station terminale pendant t, ou enfin si une maintenance est prévue pour le pipeline principal pendant cette période (ligne 29). Une opération de chargement peut être planifiée dans le pipeline de transfert à la période t si le pipeline de transfert est disponible et que les contraintes de capacité de stockage et de niveau de stockage sont respectées respectivement pour *TSL* et *TST* (lignes 31-32). À la fin, l'algorithme met à jour le niveau de stockage des bacs en utilisant l'algorithme *Storage_update* et retourne le plan d'ordonnancement et la solution évaluée (lignes 39-40).

Algorithme 4.13. DTSP_scheduling

```
1.  Input
2.     Inst: une instance, avec les éléments suivants utilisés ici:
3.       .id_MP: l'identifiant du pipeline principal
4.       .id_TST: l'identifiant du bac de stockage TST
5.       .id_TSL: l'identifiant du bac de stockage TSL
6.       .sp5: l'identifiant du pipeline de livraison pour le client local
7.       .sp6: l'identifiant du pipeline de transfert
8.       .PF: la quantité chargée dans le pipeline pl pendant une période t
9.       .LD: la quantité demandée pour le produit local P1 à chaque période t
10.      .Smax: la capacité du bac de stockage s
11.    Plan: un plan d'ordonnancement, avec les éléments suivants utilisés ici:
12.      .SCq: matrice de la quantité chargée depuis le bac s à la période t
13.      .SDq: matrice de la quantité déchargée dans le bac s à la période t
14.      .PD: matrice des décisions de chargement pour le pipeline pl à t
15.    Sol: une solution évaluée, avec les éléments suivants utilisés ici:
16.      .Sq: matrice de la quantité en stockage pour le bac s à la période t
17.      .PT: les périodes de chargement/déchargement correspondantes de pl à t
18.    t: une période
19. Output
20.    Plan: un plan d'ordonnancement
21.    Sol: une solution évaluée
22. Begin
23.    //Ordonnancement du pipeline de livraison (SP5)
24.    If Plan.PD[Inst.sp5,t] = 0 Then
25.        Plan.PD[Inst.sp5,t] <- 1   //ordonnancement du produit local
26.        Plan.SCq[Inst.id_TSL,t] <- Inst.LD[t]
27.    End If
28.    //Ordonnancement du pipeline de transfert (SP6)
29.    If Plan.PD[Inst.id_MP,t] ∉ {0,1} and Plan.PD[Inst.sp6,t] = 0 Then
30.       ds <- Sol.Smax[Inst.id_TSL,t] - Sol.Sq[Inst.id_TSL,t]
31.       If Sol.Sq[Inst.id_TST,t] >= Inst.PF[Inst.sp6] and
32.          ds >= Inst.PF[Inst.sp6] Then
33.          //l'opération de transfert de TST à TSL est possible
34.          Plan.PD[Inst.sp6,t] <- 1
35.          Plan.SCq[Inst.id_TST,t] <- Inst.PF[Inst.sp6]
36.          Plan.SDq[Inst.id_TSL,t] <- Inst.PF[Inst.sp6]
37.       End If
38.    End If
39.    Sol <- Storage_update(Inst, Plan, Sol)
40.    Return {Plan, Sol}
41. End
```

2.3. Ordonnancement des produits d'export

L'algorithme *Export_products_scheduling* est lancé pour l'ordonnancement des produits d'export. Comme illustré dans l'algorithme 4.14, un produit d'export p est sélectionné en fonction de sa priorité d'ordonnancement aux laveries, de la demande totale sur l'horizon d'ordonnancement et de son volume cumulé planifié à chaque période t (ligne 15). L'ensemble de laveries est trié dans un ordre décroissant selon la priorité de production pour le produit p (ligne 16). Une boucle WHILE est utilisée pour l'ordonnancement de la production et la distribution des pipelines secondaires aux laveries (lignes 17-27). À chaque itération, la première laverie dans le set trié est sélectionnée (ligne 18) pour l'ordonnancement. Si la laverie est disponible à la période t (ligne 21), l'algorithme détermine le nombre minimal de périodes nb pour planifier les opérations de chargement dans le pipeline secondaire relatif en tenant compte de la taille minimale du lot pour le produit p (ligne 22). La laverie w est ensuite planifiée pour chaque période de t à ($t + nb$) (lignes 23-25). Les algorithmes *Pipeline_scheduling* et *FP_scheduling* sont lancés pour l'ordonnancement du pipeline principal et des pipelines secondaires de filtration à la période t (lignes 28-29). À la fin, l'algorithme renvoie le plan de production actuel et la solution évaluée (ligne 31).

Les bacs de stockage *HSE* à la station de tête et *TSE* à la station terminale sont partagés entre les produits d'export. À toute période donnée, un seul produit d'export peut être stocké, soit dans *HSE* soit dans *TSE*. Le changement du produit stocké est alors permis, mais seulement si le bac est vide. Lors de l'utilisation de l'algorithme *Pipeline_scheduling* pour planifier un lot d'un produit d'export dans le pipeline principal à la période t, nous pouvons distinguer deux cas pour l'ordonnancement des opérations de chargement : créer un nouveau lot de produit p à partir de la période t dans le pipeline principal si le produit p est différent du produit précédemment chargé, ou continuer le chargement du même produit dans le pipeline principal à la période t, en prolongeant un lot existant.

Les conditions suivantes doivent être respectées pour l'ordonnancement d'un nouveau lot de p dans le pipeline principal :

- Le bac source HSE doit avoir suffisamment de quantité pour envoyer un lot de produit p avec une taille minimale à partir de la période t en cas de nouveau lot.
- Le bac de destination TSE doit contenir p ou être vide à la période t' et doit pouvoir recevoir un lot de taille minimale de produit p à partir de la période t' avec $t' = PT[id_MP, t]$.
- Le pipeline principal doit être disponible de t pour charger un lot de taille minimale de p.

Dans le second cas, un lot peut être modifié en ajoutant une nouvelle opération de chargement à la période t seulement si aucune contrainte de stockage ne sera violée pour HSE et TSE et que la taille du lot ne dépasse pas sa limite supérieure. *Pipeline_scheduling* est présenté dans l'algorithme 4.10.

Algorithme 4.14. Export_products_scheduling

```
1.  Input
2.     Inst: une instance, avec les éléments suivants utilisés ici:
3.      .id_MP: l'identifiant du pipeline principal
4.       .W: l'ensemble des laveries
5.       .WP: matrice de la priorité de production du produit p à la laverie w
6.     Plan: un plan d'ordonnancement, avec les éléments suivants utilisés ici:
7.       .PD: matrice des décisions de chargement pour le pipeline pl à t
8.     Sol: une solution évaluée, avec les éléments suivants utilisés ici:
9.       .PT: les périodes de chargement/déchargement correspondantes de pl à t
10. Output
11.    Plan: un plan d'ordonnancement
12.    Sol: une solution évaluée
13. Begin
14.    For t = Inst.T_start to Inst.T_end Do
15.       p <- Select an export product
16.       WS <- Sort elements of Inst.W in descending order according Inst.WP[p,w]
17.       While WS != ∅ Do
18.          w <- WS[1]
19.          WS <- WS \ w    //supprimer la laverie de l'ensemble actuel
20.          t'<- Sol.PT[w,t]
21.          If Plan.PD[w, t'] = 0 Then
22.             nb <-Determine number of periods from t' for batch with p in w
23.             For j = t' to (t' + nb) Do
24.                {Plan,Sol} <- WS_scheduling(Inst,Plan,Sol,w,p,j)
25.             End For
26.          End If
27.       End While
28.       {Plan, Sol} <- Pipeline_scheduling(Inst, plan, Sol,Inst.id_MP, p, t)
29.       {Plan, Sol} <- FP_scheduling(Inst, plan, Sol, Sol.PT[Inst.id_MP,t])
30.    End For
31.    Return {Plan, Sol}
32. End
```

Algorithme 4.15. FP_scheduling

```
Input
   Inst: une instance, avec les éléments suivants utilisés ici:
     .id_SO: l'identifiant de l'opération d'arrêt
     .W: l'ensemble des laveries
     .id_TSF: l'identifiant du bac de stockage TSF
     .id_TSE: l'identifiant du bac de stockage TSE
     .sp7: l'identifiant du pipeline secondaire (SP7) pour la filtration
     .PF: la quantité chargée dans le pipeline pl pendant une période t
     .Smax: la capacité du bac de stockage s
     .fwr: le ratio des déchets de filtration par rapport à la pulpe entrante
   Plan: un plan d'ordonnancement, avec les éléments suivants utilisés ici:
     .PD: matrice des décisions de chargement pour le pipeline pl à t
     .SCq: matrice de la quantité chargée depuis le bac s à la période t
     .SDq: matrice de la quantité déchargée dans le bac s à la période t
   Sol: une solution évaluée, avec les éléments suivants utilisés ici:
     .Sp: matrice de l'identifiant du produit dans le bac s à la période t
     .Sq: matrice de la quantité en stockage pour le bac s à la période t
   t: une période
Output
   Plan: un plan d'ordonnancement
   Sol: une solution évaluée
Begin
   If Plan.PD[Inst.sp7,t] = 0 Then
      v <- Inst.PF[Inst.sp7]
      s1 <- Inst.id_TSE     //bac source
      s2 <- Inst.id_TSF     //bac de destination
      ds <- Sol.Smax[s2] - Sol.Sq[s2,t]
      If ds >= Inst.PF[Inst.sp7]×fwr and Sol.Sq[s1,t] >= v Then
          // vérification des contraintes de capacité
          Plan.PD[Inst.sp7,t] <- Sol.Sp[s1,t]
          Plan.SCq[s1,t] <- v
          Plan.SDq[s2,t] <- v×fwr
      Else if ds < Inst.PF[Inst.sp7]×fwr and Sol.Sq[s1,t] >= v Then
          nb <- Calculate the number of periods for emptying tank TSF
          For j = t to (t + nb) Do
             Plan.PD[Inst.sp7,j] <- Inst.id_SO
             Plan.SDq[s2,j] <- Sol.Smax[s2]/nb
          End For
      Else //ordonnancement impossible
         Plan.PD[Inst.sp7,t] <- Inst.id_SO
      End If
   End if
   Sol <- Storage_update(Inst, Plan, Sol)
   Return {Plan, Sol}
End
```

L'algorithme *FP_scheduling* est conçu pour l'ordonnancement des opérations de filtration. Le pipeline de filtration SP_7 transporte les produits du bac *TSE* à l'unité de filtration. L'objectif principal de l'unité de filtration est de réduire la quantité totale d'eau présente dans la pulpe, la préparant ainsi pour une transformation ultérieure pour créer un produit fini adapté à la consommation des clients. L'opération de filtration produit une pulpe concentrée, considérée comme le produit fini dans le cadre de notre étude, et une pulpe fortement diluée, catégorisée comme déchet de filtration. Le déchet de filtration est temporairement stocké dans le bac *TSF* jusqu'à ce qu'il approche de sa

capacité maximale de stockage. Lorsque le bac atteint sa limite, il est complètement vidé avant de traiter une pulpe supplémentaire.

Comme détaillé dans l'algorithme 4.15, si le pipeline est disponible à la période t (ligne 23), les contraintes de stockage sur *TSE* et *TSF* sont vérifiées (ligne 28), et le produit p est transporté pour être filtré (ligne 30). En cas d'atteinte de la capacité maximale de TSF, le pipeline de filtration est mis en arrêt pour un nombre de périodes prédéfini permettant un vidage total du bac *TSF* (lignes 33-38). Sinon, le pipeline de filtration est en arrêt à la période t si les contraintes de stockage sur *TSE* et *TSF* ne permettent pas l'ordonnancement d'une opération de chargement (ligne 40). À la fin, l'algorithme *Storage_update* est appliqué pour mettre à jour les niveaux de stockage des bacs (ligne 43) et la solution évaluée est retournée (ligne 44).

3. EXPERIENCES NUMERIQUES

L'algorithme d'ordonnancement proposé a été implémenté en Python, et tous les tests numériques ont été effectués sur un PC équipé d'un processeur Intel Xeon Gold 6138 (2,0 GHz) fonctionnant sous Windows 10. Pour évaluer les performances de l'heuristique proposée, un ensemble de scénarios réels a été généré à partir de la chaîne de valeur intégrée de minerai de phosphate du site minier de Khouribga du Groupe OCP. Les résultats obtenus ont été validés par l'équipe de planification industrielle d'OCP comme étant des solutions d'ordonnancement faisables et souhaitables.

Dans cette section, nous commencerons par présenter l'étude de cas et les scénarios générés, suivis de la présentation des résultats et de l'évaluation des performances de l'heuristique proposée. Toutes les instances et les résultats de cette étude sont disponibles pour référence.

3.1. Étude de cas et génération de scénarios

Comme illustré dans la Figure 4.1, l'étude de cas de ce chapitre se concentre sur un segment de la chaîne d'approvisionnement intégrée de phosphate du site minier de

Khouribga. Ce segment commence aux laveries, inclut la gestion des stocks dans les bacs et englobe le transport à travers un réseau de pipelines. Le réseau comprend un pipeline principal ainsi qu'un total de sept pipelines secondaires pour le transport du minerai de phosphate des laveries aux clients, avec un stockage intermédiaire dans les bacs à chaque station.

L'étude de cas est caractérisée par des ensembles de données concernant les pipelines, les laveries, les bacs de stockage et l'ordonnancement des lots. Le tableau 4.1 fournit des détails relatifs aux pipelines, y compris leur numéro, nom, quantité transportée pendant une période donnée, et le temps total pour traverser chaque pipeline exprimé en nombre de périodes. Il est important de noter que le débit du SP_5 varie en fonction de la demande pour le produit local, qui peut fluctuer entre des limites inférieures et supérieures spécifiées. Le volume total des pipelines SP_5 et SP_6 n'est pas pris en compte, car les opérations de déchargement pour le pipeline SP_5 ne sont pas gérées dans le cadre de la chaîne de valeur considérée. De plus, les deux pipelines sont exclusivement dédiés au produit local, ce qui signifie que les opérations de chargement et de déchargement peuvent être traitées comme synchronisées.

Le tableau 4.2 présente l'ensemble de données pour les laveries, incluant leur numéro, nom, type et quantité de production par période. Ces laveries sont utilisées pour la production de tous les produits, suivant un ordre de priorité prédéfini. La valeur de l'ordre de priorité est déterminée lors du processus de génération des scénarios en fonction de la demande de produits.

Le tableau 4.3 fournit des informations relatives aux bacs de stockage, y compris leurs numéros, noms, types de produits autorisés et capacités totales de stockage. Un bac de stockage peut fonctionner comme origine pour les opérations de chargement des pipelines ou pour l'opération de filtration. Il peut également servir de destination pour les opérations de déchargement depuis un pipeline ou pour les activités de production provenant d'une laverie.

Tableau 4.1. Ensemble de données relatives aux pipelines

Numéro de pipeline	Nom de pipeline	Quantité injectée par période (m^3)	Nb de périodes pour traverser le pipeline
1	SP1	337.5	11
2	SP2	350	7
3	SP3	225	1
4	SP4	125	1
5	SP5	[500, 1000]	-
6	SP6	450	-
7	SP7	150	-
8	MP	1000	101

Tableau 4.2. Ensemble de données relatives aux laveries

Numéro de laverie	Nom de laverie	Type de laverie	Quantité de production par période (m^3)
1	W1	1	225
2	W2	2	387.5
3	W3	3	225
4	W4	3	125

Tableau 4.3. Ensemble de données relatives aux bacs de stockage

Numéro de bac	Nom de bac	Type de produit autorisé	Capacité de bac (m^3)	Unités pour charger le bac	Unités pour décharger le bac
1	SR1	Local & Export	4700	W1	SP1
2	SR2	Local & Export	10000	W2	SP2
3	HSL	Local	11500	SP1,SP2,SP3,SP4	MP
4	HSE	Export	11500	SP1,SP2,SP3,SP4	MP
5	TSL	Local	14000	MP	SP5
6	TST	Local	14000	MP	SP6
7	TSE	Export	14000	MP	SP7
8	TSF	Export	2000	-	-

Tableau 4.4. Ensemble de données pour l'ordonnancement des lots

Numéro d'opération	Type d'opération de lot	Taille min du lot de MP (m^3)	Taille max du lot de MP (m^3)	Taille min du lot de SP (m^3)
1	Produit local	4000	60000	4000
2, …, P_n	Produits d'export	4000	60000	4000
P_n +1	Eau	1000	60000	500
P_n +2	Arrêt	-	-	-

Le tableau 4.4 fournit des détails relatifs à l'ordonnancement des lots, y compris le numéro d'opération, la nature de l'opération d'un lot et les tailles minimales et maximales des lots. Ces tailles sont déterminées en fonction du type d'opération et du pipeline impliqué. Le tableau affiche quatre types d'opérations, comprenant trois opérations de chargement (pour les produits locaux, les produits d'exportation et l'eau) et une opération d'arrêt. Les opérations de chargement peuvent avoir lieu dans deux types de pipelines, à savoir le pipeline principal et les pipelines secondaires.

Tous les ensembles de données mentionnés ci-dessus sont communs à divers scénarios dans l'étude de cas considérée. Le processus de génération de scénarios implique la variation de plusieurs paramètres, y compris le nombre total de produits ($n = 4$), la longueur de l'horizon de temps mesurée en nombre de périodes (égal à T_{end}), le stock initial des bacs de stockage, les états initiaux des pipelines et des laveries et la demande des clients pour chaque produit tout au long de l'horizon de temps. Il est essentiel de noter que la formulation de la demande des clients dépend du type de produit. Pour le produit local, qui doit être livré en continu, $LD[t]$ signifie la quantité demandée à charger depuis le bac TSL dans le pipeline SP_5 pendant la période t de T_{start} à T_{end}. Pour les produits d'export, nous considérons uniquement le volume filtré total à T_{end}.

Dans l'industrie du phosphate, les machines nécessitent des arrêts temporaires fréquents pour la maintenance préventive. Ainsi, tout plan d'ordonnancement destiné à une application industrielle doit tenir compte des arrêts prévus. Dans cette étude, nous

mettons l'accent sur la maintenance préventive des laveries, des pipelines secondaires et du pipeline principal. De plus, les laveries sont initialisées avec le plan de production résiduel restant à exécuter, tandis que les pipelines sont initialisés avec l'ensemble des lots chargés. Deux scénarios sont générés et les ensembles de données pour ces scénarios sont détaillés dans les sous-sections suivantes.

3.1.1. Données de l'instance du scénario 1

Dans le Scénario 1, le nombre total de produits est fixé à 4. La durée totale de l'horizon d'ordonnancement est fixée à 11 jours, soit $11 \times 24 \times 4 = 1056$ périodes. Les deux premiers jours sont consacrés à la phase d'initialisation, couvrant 192 périodes, tandis que les 9 jours suivants constituent l'horizon d'ordonnancement disponible, allant de T_{start} (période 193) à T_{end} (période 1056). T_1 est numéroté comme période 1.

Le tableau 4.5 affiche l'ensemble de données pour l'état initial des pipelines, fournissant des informations sur le numéro du pipeline respectif, le type du produit chargé et les premières et dernières périodes de chargement. Il est important de noter que toutes les opérations de chargement présentées dans ce tableau ont déjà été complétées. Les opérations d'arrêt du pipeline avant la période T_{start} ne sont pas incluses dans cet ensemble de données. Le nombre total de périodes de chargement pour chaque pipeline correspond au volume total du pipeline, comme indiqué dans ce tableau.

Tableau 4.5. Ensemble de données relatives à l'état initial des pipelines

Numéro de pipeline	Nom de pipeline	Numéro d'opération	Type d'opération	Première période d'injection	Dernière période d'injection	Nb de périodes d'injection
1	SP1	1	Local	182	192	11
2	SP2	1	Local	186	192	7
3	SP3	1	Local	192	192	1
4	SP4	1	Local	192	192	1
8	MP	1	Local	92	109	18
8	MP	5	Eau	110	120	11

8	MP	1	Local	121	142	22
8	MP	1	Eau	143	152	10
8	MP	5	Local	153	174	22
8	MP	1	Eau	175	184	10
8	MP	5	Local	185	192	8

Le tableau 4.6 présente l'ensemble de données relatives aux produits, incluant des informations sur la demande totale sur les périodes d'ordonnancement et le score de priorité pour les activités de production aux laveries. De plus, le tableau 4.7 fournit la demande pour le produit local par période pendant toutes les périodes d'ordonnancement de T_{start} à T_{end}. Le débit de la demande reste constant chaque jour à partir du 3e jour de l'horizon. Les deux premiers jours sont consacrés à l'initialisation. Le niveau de stockage initial et le produit stocké dans les bacs sont représentés comme suit : TSq = {2820, 7200, 2940, 3240, 8100, 7680, 8260,1000}, et TSp = {1,1,1,2,1,1,2,5}.

Le tableau 4.8 donne les périodes de maintenance préventive des laveries pendant les périodes d'ordonnancement de T_{start} à T_{end}. Pour le scénario 1, la laverie w_1 est en maintenance pendant 76 périodes à partir de T_{start}. L'algorithme d'ordonnancement peut planifier les opérations d'arrêt pour les laveries et leurs pipelines secondaires.

Tableau 4.6. Ensemble de données relatives aux produits

Numéro de produit	Type de produit	Demande totale (m^3)	Priorité de production à W1	Priorité de production à W2	Priorité de production à W3	Priorité de production à W4
1	Local	655680	8	10	3	7
2	Export	30 000	0	0	10	0
3	Export	10 000	0	0	10	0
4	Export	0	0	0	10	0

Tableau 4.7. Demande du produit local par jour sur l'horizon d'ordonnancement (m^3)

Jour	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Première période	193	289	385	481	577	673	769	865	961
Dernière période	288	384	480	576	672	768	864	960	1056
Quantité par période	739	739	739	739	698	704	824	824	824

Tableau 4.8. Périodes de maintenance préventive des laveries

Numéro de laverie	Nom de la laverie	Numéro d'opération	Description de l'opération	Première période	Dernière période	Nb de périodes
1	W1	6	Arrêt	193	268	76

3.1.2. Données de l'instance du scénario 2

Pour le scénario 2, le nombre total de produits est égal à 4. La longueur totale de l'horizon d'ordonnancement est fixée à 11 jours (1056 périodes) avec les deux premiers jours pour la phase d'initialisation (192 périodes) et 9 jours d'horizon d'ordonnancement disponible de T_{start} à T_{end} (864 périodes).

Tableau 4.9. Ensemble de données relatives à l'état initial des pipelines

Numéro de pipeline	Nom de pipeline	Numéro d'opération	Type d'opération	Première période d'injection	Dernière période d'injection	nb de périodes d'injection
1	SP1	1	Local	182	192	11
2	SP2	1	Local	186	192	7
3	SP3	1	Local	192	192	1
4	SP4	1	Local	192	192	1
8	MP	1	Local	93	112	20
8	MP	5	Eau	113	122	10
8	MP	1	Local	123	157	35
8	MP	1	Eau	158	166	9
8	MP	5	Local	167	192	26

Tableau 4.10. Ensemble de données relatives aux produits

Numéro de produit	Type de produit	Demande totale (m^3)	Priorité de production à W1	Priorité de production à W2	Priorité de production à W3	Priorité de production à W4
1	Local	731 136	8	10	3	7
2	Export	10000	0	0	10	0
3	Export	0	0	0	10	0
4	Export	30000	0	0	10	0

Tableau 4.11. Demande du produit local par jour sur l'horizon d'ordonnancement (m^3)

Jour	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Première période	193	289	385	481	577	673	769	865	961
Dernière période	288	384	480	576	672	768	864	960	1056
Quantité par période	854	865	854	854	833	761	865	865	865

Sur le même principe que dans le scénario 1, le tableau 4.9 et le tableau 4.10 présentent respectivement l'ensemble de données relatives à l'état initial des pipelines et les caractéristiques des produits. Le tableau 4.11 illustre la demande du produit local par période sur les périodes d'ordonnancement de T_{start} à T_{end}. Le niveau de stockage initial et le produit stocké dans les bacs sont donnés par TSq = {1080, 5520, 3360, 0, 4560, 10000, 2000,1000}, et TSp = {1,1,1,4,1,1,4,5}. Aucune période de maintenance préventive pour les laveries ou pour les pipelines n'est prise en compte dans ce scénario.

3.2. Résultats des scénarios

3.2.1. Résultats pour le scénario 1

Le diagramme de Gantt de la Figure 4.3 illustre le plan d'ordonnancement de toutes les unités. Il affiche le plan de chargement des pipelines ainsi que l'ordonnancement des opérations de production et de filtration pour chaque période. Dans ce scénario, nous avons planifié une maintenance préventive pour W_1 durant 8

heures, une opération de rinçage, et les plannings de production pour trois produits différents. W_3 a été attribué à la production de P_2 et P_3 vu qu'il détient le score de priorité le plus bas pour la production de P_1.

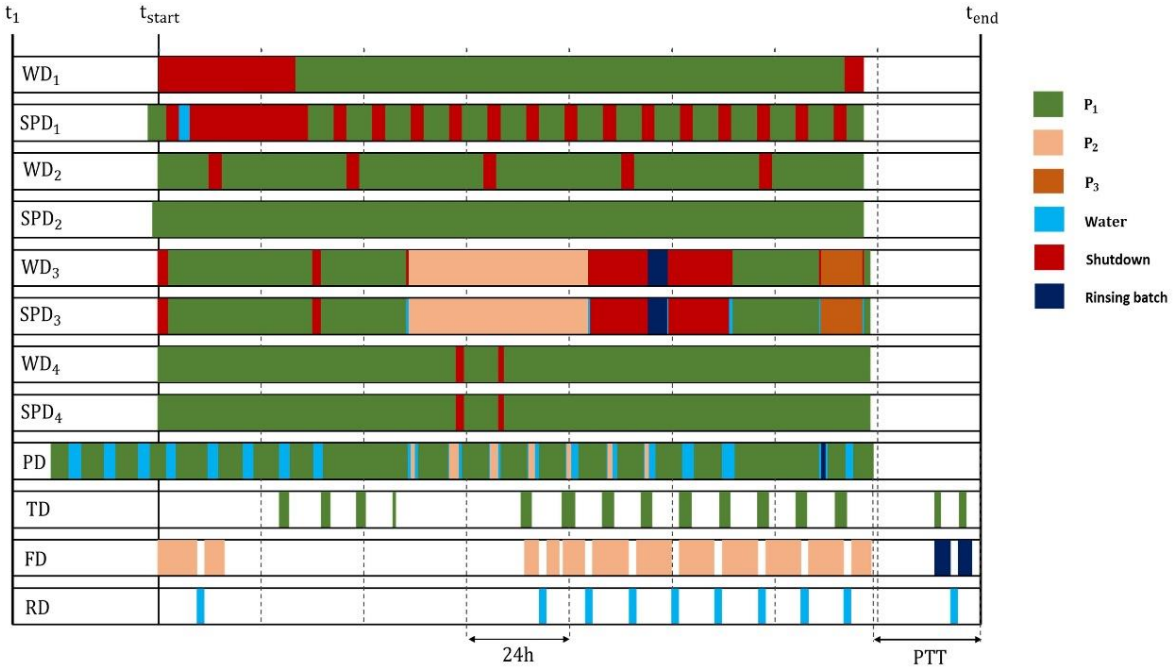


Figure 4.3. Solution d'ordonnancement obtenue pour le scénario 1

Pour éviter la contamination de P_3, le premier lot planifié pour P_3 dans W_3 sert de lot de rinçage. La production de P_3 ne peut se poursuivre que si le bac HSE est vide. Le lot de rinçage est chargé dans le pipeline principal pour arriver à la station terminale après que TSE soit vidé de P_2. TST est choisi pour stocker P_1 pendant une heure (équivalent à 4 périodes) après que TSL a eu atteint sa capacité maximale de stockage. Le temps de transport P_{mp} pour traverser le pipeline principal est de 101 périodes. La Figure 4.5 donne un aperçu des bacs HSL, HSE, TSL, et TSE, montrant l'évolution des niveaux de stockage. Les contraintes de capacité des bacs sont respectées de manière constante.

3.2.2. Résultats pour le scénario 2

Le diagramme de Gantt de la Figure 4.4 illustre le plan d'ordonnancement de toutes les unités. W_3 a été choisi pour la production de P_4 et P_1 vu qu'il a le score de

priorité le plus bas pour la production de P_1. La Figure 4.6 présente l'évolution des bacs HSL, HSE, TSL, et TSE. Les contraintes de capacité des bacs sont respectées comme montré dans la Figure 4.6.

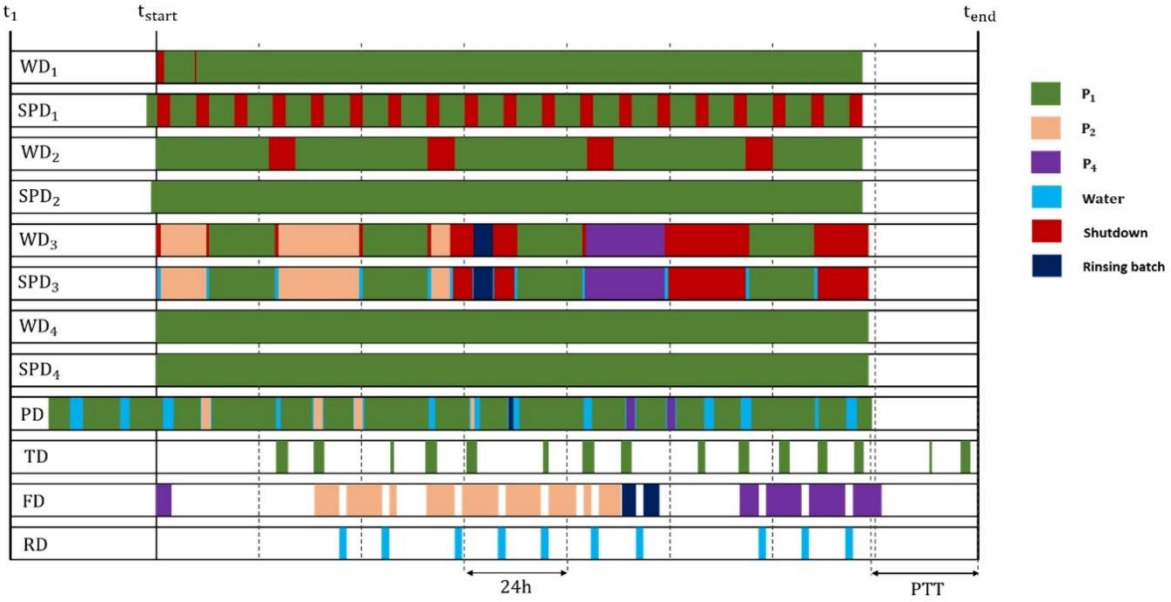


Figure 4.4. Solution d'ordonnancement obtenue pour le scénario 2

Concernant le temps CPU, l'algorithme a nécessité 515 secondes pour fournir la solution d'ordonnancement pour le scénario 1 et 553 secondes pour le scénario 2. Dans le scénario 1, il y a eu une rupture de stock de P_1 de 10826 m³, ce qui constitue 1,65 % de la demande totale. Dans le scénario 2, la rupture de stock était de 6032 m³, représentant 0,82 % de la demande totale de P_1. Il est à noter que les ruptures de stock causées par l'ordonnancement manuelle sont en moyenne plus élevées que les résultats obtenus. Dans le scénario 1, la demande pour P_2 a été entièrement satisfaite, et la planification de P_3 dans le pipeline principal s'étend au-delà de l'horizon de planification. Cependant, pour le scénario 2, toute la demande a été satisfaite pour P_2 et P_4.

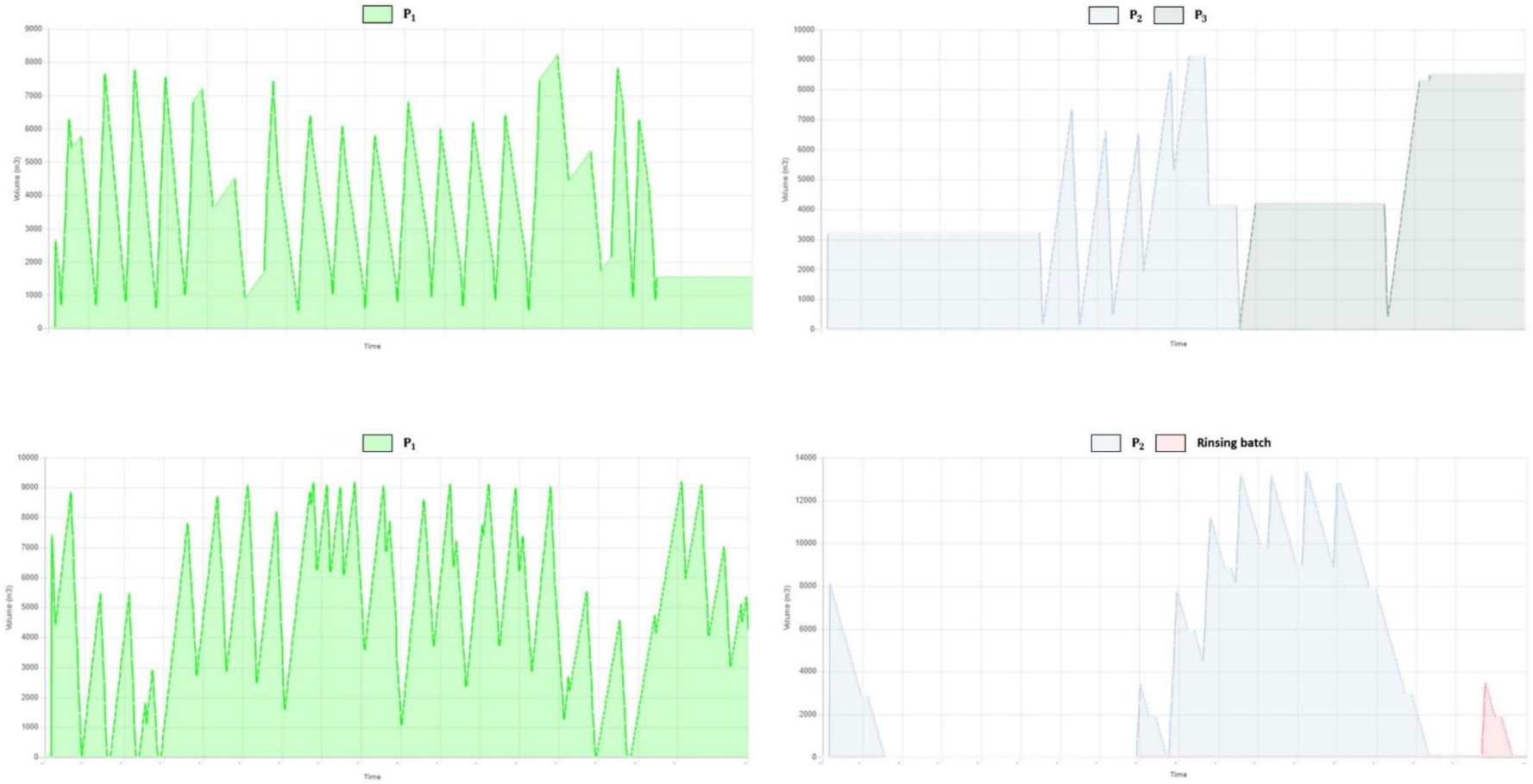


Figure 4.5. Variations des niveaux de stockage de HSL, HSE, TSL et TSE pour le scénario 1

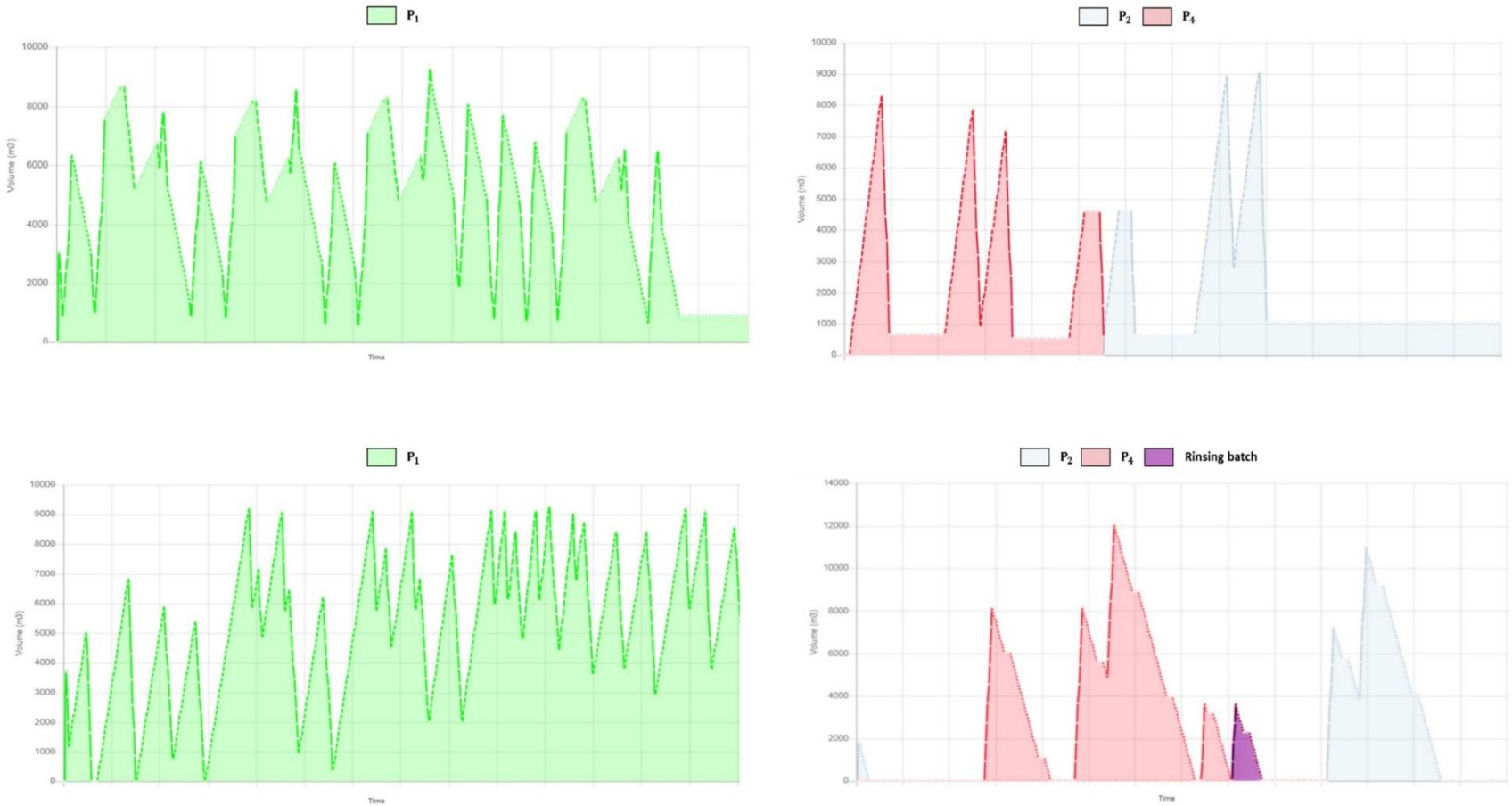


Figure 4.6. Variations des niveaux de stockage de HSL, HSE, TSL et TSE pour le scénario 2

4. CONCLUSION

L'objectif principal de ce chapitre est de fournir une approche permettant d'obtenir des solutions opérationnellement faisables pour le problème d'ordonnancement intégré des réseaux de pipelines dans l'industrie du phosphate. Une heuristique basée sur la simulation en temps discret a été développée pour générer efficacement des solutions souhaitables pour le problème présenté. L'approche proposée a été testée avec succès et adoptée par le Groupe OCP comme outil d'aide à la décision pour effectuer les tâches d'ordonnancement quotidiennes et simuler des scénarios théoriques et pratiques complexes sur des horizons à court et à moyen terme. La solution d'ordonnancement prend en compte de multiples contraintes opérationnelles, y compris les contraintes de rinçage des bacs et les contraintes de séparation de l'eau entre différents produits dans les pipelines, tout en assurant que les demandes des clients sont satisfaites avec un minimum de changements de produits dans les laveries.

L'heuristique proposée a donné des résultats satisfaisants après huit mois d'exploitation dans des conditions réelles. Étant donné la complexité du problème d'ordonnancement industriel et la multitude de contraintes impliquées, des événements imprévus peuvent se produire fréquemment au cours d'une seule journée. Par conséquent, les décisions d'ordonnancement réelles peuvent dévier des solutions proposées par l'heuristique. Les changements potentiels des plans d'ordonnancement peuvent être anticipés et l'approche proposée peut également être adaptée pour des scénarios dynamiques.

Chapitre 5 : Une approche originale basée sur un MILP à horizon glissant centré sur les produits pour un problème réel d'ordonnancement intégré de la production et de la distribution

Ce chapitre reproduit et étend les résultats et les conclusions des articles publiés suivants :

Mouad SIDKI, Tchernev NIKOLAY, Pierre FÉNIÈS, Libo REN, Selwa EL FIRDOUSSI, (2025). **A novel rolling horizon product-centric MILP based approach for a real-world integrated production and distribution scheduling problem.** Under review by OMEGA - The International Journal of Management Science. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4895719

Mouad SIDKI, Tchernev NIKOLAY, Selwa EL FIRDOUSSI. (2022). **A MILP approach for detailed pipeline scheduling and storage management problem in the phosphate industry**. IFAC-PapersOnLine, 55(10), 2563–2568. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.095

1. INTRODUCTION

Ce chapitre traite un problème réel d'ordonnancement de la chaîne de valeur intégrée de phosphate sur le site minier de Khouribga du groupe OCP, qui produit environ 70 % du total du minerai de phosphate du groupe. Comme présenté dans la Figure 5.1, le problème d'ordonnancement considéré commence dans quatre laveries différentes à Khouribga et se termine au complexe industriel de Jorf Lasfar (station terminale), où des clients locaux et internationaux utilisent différents produits. En raison de la complexité du problème étudié et des multiples contraintes industrielles

adoptées, l'ordonnancement est traditionnellement effectué manuellement à l'aide de feuilles de calcul, comme c'est le cas pour de nombreuses industries (Csontos et al., 2022). L'approche proposée vise à augmenter l'efficacité opérationnelle, à améliorer l'adaptabilité de l'équipe d'ordonnancement aux changements dynamiques et à anticiper les événements futurs.

Le minerai de phosphate extrait des différentes mines réparties à Khouribga subit plusieurs étapes avant d'atteindre les laveries. Le minerai est dynamité et extrait des mines, transporté vers des concasseurs où il est réduit en tailles plus petites et gérables, puis acheminé vers les laveries pour être davantage traité. En fonction de la composition du minerai de phosphate et du produit ciblé, les processus des laveries impliquent plusieurs opérations telles que l'extraction, l'enrichissement, ainsi que des traitements physiques tels que la séparation, la classification, le lavage et la calcination. Le produit résultant est une pulpe hydrophobe composée de particules en suspension dans l'eau. La pulpe est ensuite traitée pour garantir la bonne granularité, la taille des particules et la concentration pour le transport via les pipelines.

Les pipelines multiproduits jouent un rôle essentiel dans les chaînes de valeur énergétique mondiale (Qiu et al., 2019), garantissant la disponibilité de l'énergie en aval en transportant efficacement de grandes quantités de produits raffinés sur de longues distances. Comparés aux moyens de transport traditionnels tels que les trains et les camions, les pipelines entraînent des coûts opérationnels plus bas, une grande fiabilité, un impact environnemental réduit et une résilience aux conditions météorologiques défavorables (Liao et al., 2018a). Dans l'industrie minière, les slurry pipelines sont spécialement conçus pour le transport de la pulpe de minerai sur de longues distances, garantissant une livraison continue des produits aux stations terminales et réduisant la dépendance à l'égard de bacs de stockage surdimensionnés pour répondre à la demande des clients. Un ordonnancement efficace par pipeline multiproduits a un impact profond sur l'efficacité opérationnelle, la gestion des coûts et la résilience des chaînes de valeur.

Comme illustré dans la Figure 5.1, la station de tête est connectée aux laveries par l'utilisation de plusieurs pipelines secondaires. La station terminale est connectée à

la station de tête via le pipeline principal, qui mesure 187 km de long. On peut distinguer deux types de produits : un produit local P_1 et plusieurs produits destinés à l'exportation. Le produit local (désigné P_1) est utilisé par les unités de traitement chimique de la station terminale pour produire de l'acide phosphorique et une large gamme d'autres produits. Ce produit a un débit de demande continu ; par conséquent, un approvisionnement continu est crucial pour garantir le bon fonctionnement des processus industriels. Pour les produits d'export, après leur arrivée à la station terminale, ils subissent un processus de filtration pour réduire l'humidité contenue dans la pulpe avant un processus de séchage, puis ils sont exportés via le port de Jorf Lasfar. La demande de produits d'export diffère de la demande de P_1 vu qu'ils ont des dates d'échéance associées à la présence de bateaux dans le port, et l'objectif est "*make to stock*" plutôt que de "*make to order*" dans le cas de P_1.

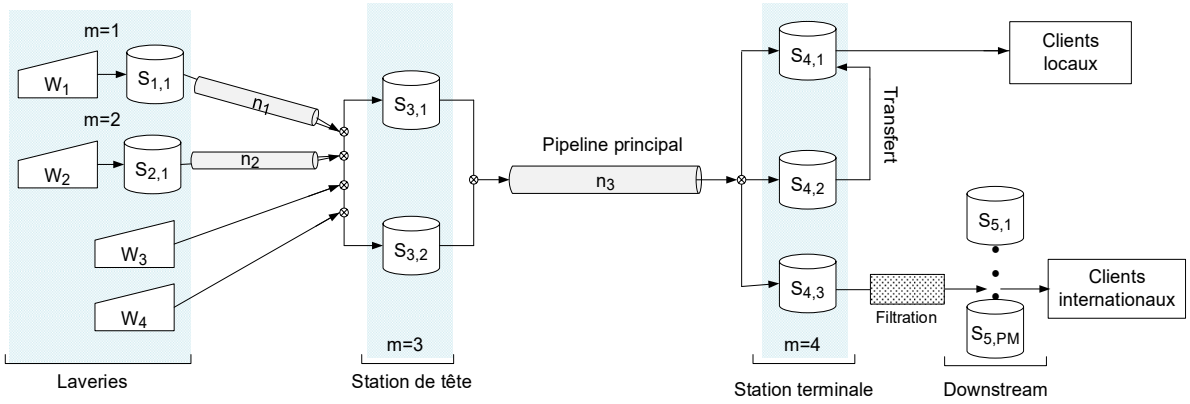


Figure 5.1. Aperçu schématique du problème d'ordonnancement

L'utilisation de pipelines dans l'industrie du phosphate garantit la livraison continue de produits sur de longues distances, sans avoir recours à des bacs surdimensionnés. Par exemple, l'autonomie du produit P_1 dans la station terminale en cas de scénarios de demande moyenne élevée est inférieure à quatre heures. Contrairement à l'industrie pétrolière, les bacs dans ce problème ont une autonomie relativement plus petite et sont capables de stocker différents produits à différentes périodes, ce qui augmente la complexité du problème d'ordonnancement. Par exemple, les bacs dans les laveries sont capables de stocker tous les produits, dans la station de tête, le bac $S_{3,1}$ est dédié au produit P_1, tandis que les bacs $S_{3,2}$ et $S_{4,3}$ sont réservés aux

produits d'export. De plus, en raison de la forte demande pour le produit P_1, il est attribué à deux bacs à la station terminale, $S_{4,1}$ et $S_{4,2}$, connectés par l'utilisation d'un pipeline de transfert.

Pour résoudre le problème d'ordonnancement présenté de la chaîne de valeur intégrée de phosphate de l'OCP, composée du problème d'ordonnancement de la production des laveries, d'un problème d'ordonnancement d'un réseau de pipelines unidirectionnel et d'un problème de gestion de stocks multiproduits, une approche de solution basée sur la programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) à temps discret a été développée dans ce chapitre. La solution adopte une approche dynamique à horizon glissant pour les horizons d'ordonnancement à court terme, mettant à jour systématiquement la solution d'ordonnancement à la fin de chaque segment prédéfini k de l'horizon d'ordonnancement glissant en cas de déviation entre les données réelles et la solution proposée. L'objectif est de minimiser les ruptures de stock et la quantité totale d'eau injectée dans les pipelines. De plus, un modèle MILP de post-traitement est utilisé sur la solution obtenue à la fin de l'horizon glissant, pour davantage la raffiner avec l'objectif de minimiser le nombre de changements de décisions d'ordonnancement pour plusieurs opérations, améliorant ainsi la qualité de la solution et lissant quelques courbes de niveaux de stocks des bacs (puisque le nombre de changements d'état des opérations est réduit). L'objectif de l'approche proposée est de fournir des solutions de bonne qualité sur un horizon d'ordonnancement glissant prédéfini, composé d'un certain nombre de segments KM . Pour chaque segment k , un horizon d'ordonnancement H_1 d'une durée D pour les opérations d'injection des pipelines est considéré ; une fois la solution obtenue, les premières R heures de H_1 sont conservées tandis que les dernières $D - R$ heures sont éliminées. De plus, un horizon H_0 est considéré avant H_1 pour l'initialisation des pipelines et des laveries avec les décisions précédemment planifiées, et un horizon H_2 est considéré pour la décharge complète des lots présents dans le pipeline principal à la fin de H_1.

Les paramètres d'entrée suivants sont connus :

- Le nombre de segments considérés pour l'horizon d'ordonnancement glissant.
- La durée des périodes discrètes composant l'horizon d'ordonnancement.

- Les périodes de début et de fin de H_0, H_1 et H_2.
- Le nombre de produits.
- Le débit des pipelines, des laveries, et le débit des unités de filtration et de transfert.
- Le nombre minimum de périodes considérées pour un ordonnancement continu des décisions dans les laveries et les pipelines.
- Les débits de consommation du produit local P_1 et les demandes quotidiennes pour les produits d'export.
- Les capacités des bacs.
- L'ensemble des produits autorisés à être planifiés dans chaque laverie et dans chaque bac.
- Le planning d'injection des lots présents dans les pipelines avant le début de H_1 et les décisions précédemment planifiées dans les laveries.
- Les niveaux de stocks initiaux et les produits présents dans les bacs.
- Les fenêtres de temps de maintenance des pipelines et des laveries.

Les hypothèses suivantes sont considérées :

- Les pipelines sont unidirectionnels et le flux inverse n'est pas autorisé.
- Les pipelines sont toujours pleins et les produits qu'ils contiennent sont incompressibles.
- Les débits des pipelines et des laveries sont constants.
- Un seul produit peut être planifié à chaque intervalle de temps dans un pipeline (injecté ou déchargé), dans une laverie, dans un bac ou dans l'unité de filtration.
- L'arrêt du pipeline principal et du pipeline secondaire n_2 en dehors des fenêtres de temps de maintenance prédéterminées n'est pas autorisé. L'arrêt du pipeline n_1 est autorisé.
- Le suivi des lots dans le pipeline de transfert n'est pas pris en compte car il est conçu pour transporter un seul produit sur une distance négligeable.
- En raison de la proximité des laveries w_3 et w_4 à la station de tête, les opérations de transport de leurs pipelines secondaires ne sont pas considérées, et la pulpe produite est directement stockée dans les bacs de la station de tête.

- Les bacs $S_{3,1}$, $S_{4,1}$ et $S_{4,2}$ sont dédiés au stockage du produit local P_1, tandis que les autres bacs sont partagés entre les produits d'export. Un seul produit peut être stocké dans un bac à chaque intervalle de temps.

L'objectif de ce chapitre est de proposer une approche de solution holistique pour un problème réel d'ordonnancement de réseau de pipelines unidirectionnel, un problème d'ordonnancement de production impliquant plusieurs laveries et un problème de gestion de stocks multiproduits pour des bacs capables de stocker plusieurs produits. La solution proposée est une approche d'ordonnancement dynamique basée sur un horizon glissant, utilisant une formulation de programmation linéaire en nombres entiers mixtes discrète centrée sur les produits, capable de trouver des solutions de bonne qualité pour le problème réel d'ordonnancement de la chaîne de valeur intégrée du groupe OCP présenté. Les contributions de cette recherche sont décrites comme suit :

- Le développement d'une formulation centrée sur les produits pour le problème de transport par réseau de pipelines basée sur une représentation en temps discret.
- Le développement d'une solution intégrée détaillée pour un problème d'ordonnancement de transport par réseau de pipelines et un problème de production dans les laveries dans l'industrie minière. La littérature se concentre souvent sur l'ordonnancement du transport par pipeline et simplifie excessivement les opérations de production.
- L'introduction d'une solution pour la gestion des bacs multiproduits, permettant le stockage de différents produits dans le même bac.
- Une formulation pour garantir la décharge complète des pipelines à la fin de l'horizon d'ordonnancement des injections H_1 , afin d'évaluer l'impact des décisions d'ordonnancement des injections sur la demande et les bacs à la station terminale.
- La mise en œuvre d'une approche d'ordonnancement dynamique basée sur une décomposition à horizon glissant, suivie d'un post-traitement pour affiner la solution obtenue.

2. APPROCHE A HORIZON GLISSANT

2.1 Nomenclature

Ensembles des indices	
$p \in P = \{1, \dots, PM\}$	Ensemble de produits. PM indique le nombre total de produits.
$cp \in CP = \{1, \dots, CPM\}$	Ensemble de produits utilisés pour le traitement chimique défini par un débit continu.
$dp \in DP = P \backslash CP$	Ensemble de produits d'export.
$n \in N = \{1, \dots, NM\}$	Ensemble de pipelines. NM indique le nombre total de pipelines.
$q \in WS = \{1, \dots, \mathrm{W}M\}$	Ensemble de laveries. WM indique le nombre total de laveries.
$k \in K = \{1, \dots, KM\}$	Ensemble de segments composant l'horizon d'ordonnancement glissant.
$t \in T = \{1, \dots, TM\}$	Ensemble de périodes discrètes. TM représente la dernière période d'ordonnancement d'un segment k.
$m \in M = \{1, \dots, MM\}$	Ensemble de stations. MM indique le nombre total de stations.
$s \in S_m = \{1, \dots, SM_m\}$	Ensemble de bacs à chaque station m. SM_m indique le nombre de bacs à la station m.
$u \in U = \{1, \dots, \mathrm{W}M + NM\}$	Ensemble de laveries $u \in WS$ et de pipelines $u \in \{\mathrm{W}M + 1, \dots, \mathrm{W}M + NM\}$.
$a \in APU_u$	Ensemble de décisions autorisées à prendre dans l'unité u. APU_u contient les produits a $\in P$ qui peuvent être traités par u, la décision $a = PM + 1$ fait référence à une décision d'ordonnancement d'un arrêt, et $a = PM + 2$ fait référence à l'ordonnancement de l'eau dans les pipelines.
$b \in APS_{m,s}$	Ensemble de produits autorisés à être stockés dans le bac s de la station m.
Paramètres continus	
TS	le début de l'horizon d'ordonnancement $\{TS, \dots, TM\}$. $\{0, \dots, TS - 1\}$ représente l'horizon d'initialisation pour les anciennes décisions d'ordonnancement des pipelines et des laveries.
τ	la durée des intervalles de temps dans T (h).
D	la durée totale d'un segment de l'horizon d'ordonnancement k (h).
R	la durée de la solution retenue d'un segment de l'horizon d'ordonnancement k (h).
F_n	le volume du pipeline n (m^3).
PF_n	le débit du pipeline n (m^3/h).
$QR_{q,p}$	le débit de traitement du produit p dans la laverie q (m^3/h).

FFU	le débit de l'unité de filtration (m^3/h)
TFU	le débit de l'opération de transfert (m^3/h).
$TT_n = \lceil \frac{F_n}{PF_n \times \tau} \rceil$	le nombre de segments dans le pipeline n. $\lceil x \rceil$ est la fonction plafond de x.
TPF_n, TPL_n	la dernière période d'ordonnancement pour les décisions d'injection et de déchargement dans le pipeline n.
TWL_q	la dernière période d'ordonnancement pour les opérations dans la laverie q.
TML_m	la dernière période considérée pour les calculs des niveaux de stock des bacs dans la station m.
MSD_n	le nombre maximal de périodes d'arrêt autorisées pour le pipeline n pendant $\{TS, \dots, TPL_n\}$.
$PB_{u,a}$	le nombre minimal d'intervalles de temps autorisés pour la planification continue de la décision a dans l'unité u.
$VMTA_{m,s}$,$VMTI_{m,s}$	niveaux de stock maximum et minimum autorisés dans le bac s à la station m (m^3).
$VMTO_{m,s}$	stock initial dans le bac s à la station m (m^3).
$VMTQ_{m,s}$	la quantité maximale autorisée dans le bac s, à la station m, en cas de changement de produit dans le bac (m^3).
$PD_{p,t}$	la quantité demandée du produit p pendant t (m^3).
WC_a	poids utilisés dans la fonction objectif pour les quantités de rupture de produits et la quantité totale d'eau injectée dans les pipelines pendant l'horizon d'ordonnancement.
M	une grande constante.
σ	une petite constante.

Paramètres binaires

$PIN_{u,a,t}$	=1 si la décision a est planifiée pendant t dans l'unité u. $PIN_{u,a,t}$ représente l'initialisation des décisions d'injection dans les pipelines avant TS, en plus des intervalles de temps de maintenance avant TPL_n. Pour les laveries, cela représente les décisions de production prises avant TS en plus des intervalles de temps de maintenance avant TWL_q.
$OS_{m,s,b}$	=1 si le bac s dans la station m contient le produit $b \in APS_{m,s}$ au début de l'horizon d'ordonnancement.
ST_n	=1 si les arrêts en dehors de la maintenance préventive ne sont pas autorisés dans le pipeline n

Variables continues

$vmt_{m,s,t}$	niveau de stock dans le bac s de la station m pendant t (m^3).
$ps_{p,t}$	quantité de rupture du produit p pendant t (m^3).

Variables binaires	
$yw_{q,a,t}$	=1 si la laverie q traite $a \in APU_q$ during t.
$c_{n,a,t}$	=1 si le produit ou l'eau a est injecté dans le pipeline n ou si un arrêt $a = PM + 1$ est planifié pendant t.
$d_{n,a,t}$	=1 si le produit ou l'eau a est déchargé du pipeline n ou si un arrêt $a = PM + 1$ est planifié pendant t.
$z_{n,t,j}$	=1 si la somme des arrêts $\sum_{v=t-TT_n-j}^{t-1} c_{n,PM+1,v} = j$ pour $j \in \{1, \dots, 1 + MSD_n\}$ et aucun arrêt n'est planifié pendant t et $t - TT_n - j$. $z_{n,t,0} = 1$ si et seulement si aucun arrêt n'est planifié à t et $\sum_{j=1}^{j=MSD_n} z_{n,t,j} = 0$.
${y^+}_{n,t,j}$, ${y^-}_{n,t,j}$	variables introduites pour les calculs de $z_{n,t,j}$.
tr_t	=1 si l'opération de transfert est active pendant t.
$fl_{dp,t}$	=1 si l'unité de filtration traite le produit dp pendant t.
lpr_t	=1 si le produit local P_1, déchargé à la station $m = 4$ pendant t, est stocké dans le bac $S_{4,1}$; sinon, il est stocké dans le bac de transfert $S_{4,2}$ et $lpr_t = 0$.
$lprd_t$	=1 en cas de déchargement de P_1 à la station terminale pendant t ($d_{NM,1,t} = 1$) et $lpr_t = 1$; sinon, $lprd_t = 0$.
$qst_{m,s,b,t}$	=1 si le bac s dans la station m contient le produit b à t. $qst_{m,s,b,t}$ est défini uniquement pour les bacs multiproduits où $\lvert APS_{m,s} \rvert > 1$.
$mst_{\mathrm{m,s},t}$	Pour le bac multiproduit $S_{m,s}$, si le niveau de stock est supérieur à $VMTQ_{m,s}$, $mst_{\mathrm{m,s},t} = 0$; sinon, $mst_{\mathrm{m,s},t}$ peut prendre l'une ou l'autre des valeurs.
$dc_{v,t}$	=1 si la décision d'ordonnancement pendant t diffère de la décision prise pendant $t - 1$ pour la laverie w_2 ($v = 1$), l'unité de transfert ($v = 2$), l'unité de filtration ($v = 3$), et le choix du bac pour le stockage de P_1 à la station terminale lpr_t ($v = 4$).

Ces variables, ainsi que les paramètres définis précédemment, servent de composants aux modèles de programmation linéaire en nombres entiers mixtes de la section suivante.

2.2. Approche de solution

L'approche proposée pour le problème d'ordonnancement considéré est basée sur l'utilisation d'un horizon glissant, où l'horizon d'ordonnancement est segmenté en un certain nombre KM d'intervalles discrets. Pour chaque itération $k \in \{1, \dots, KM\}$, les conditions initiales et les paramètres du problème sont déterminés en fonction de la

solution obtenue lors de l'itération précédente $k-1$, ainsi que de toutes les données d'entrée globales pertinentes pour le modèle. Le modèle MILP est ensuite résolu pour un horizon d'ordonnancement de D heures. Après avoir obtenu une solution pour le segment k pour un horizon de D heures, seules les premières R heures de la solution sont retenues, tandis que le reste de la solution est ignoré. Le processus d'ordonnancement avance séquentiellement à travers chaque segment k, jusqu'à ce que le segment final KM soit atteint. La décomposition de l'horizon global d'ordonnancement est illustrée dans la Figure 5.2.

L'approche d'ordonnancement par horizon glissant offre une méthode dynamique et flexible pour un ordonnancement opérationnel détaillé, permettant aux décideurs d'anticiper et de préparer les demandes à venir, les maintenances et d'autres variables opérationnelles pertinentes. Cette approche met à jour systématiquement la solution d'ordonnancement à mesure que de nouvelles informations deviennent disponibles, incorporant les données les plus actuelles, garantissant ainsi que l'ordonnancement reste aligné avec l'environnement opérationnel réel.

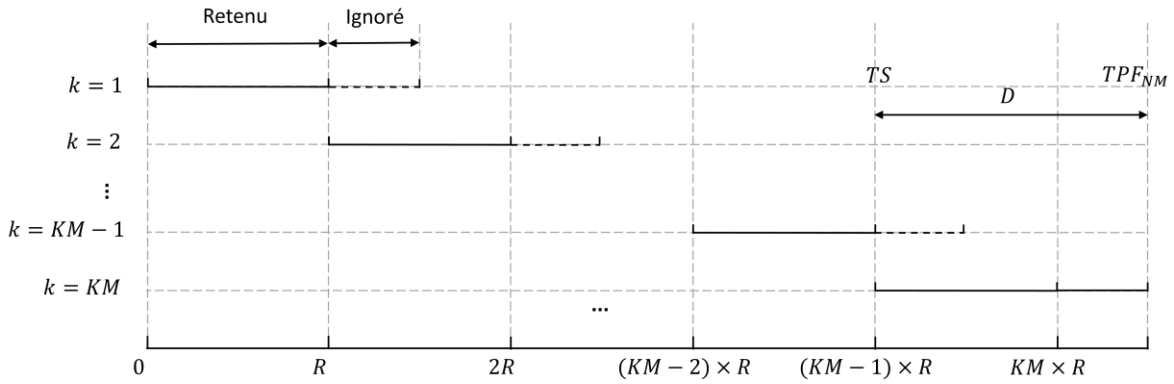


Figure 5.2. Décomposition de l'horizon glissant

Un organigramme illustrant l'approche d'ordonnancement est présenté dans la Figure 5.3. Les données initiales contiennent des entrées pertinentes telles que la demande de produits, les fenêtres de maintenance programmées et les états initiaux des pipelines, laveries et bacs. Ces données initiales sont traitées et utilisées dans la formulation du modèle MILP. Le modèle est ensuite résolu dans une limite de temps spécifiée. Une fois qu'une solution pour le modèle MILP est obtenue, elle est traitée

pour mettre à jour une solution globale d'ordonnancement. Le processus d'ordonnancement se poursuit de manière itérative jusqu'à atteindre le dernier segment KM de l'horizon d'ordonnancement glissant.

Lorsque le segment final KM est atteint et qu'une solution est identifiée, la solution globale d'ordonnancement est mise à jour une dernière fois. La solution globale est également affinée à l'aide d'un post-traitement. La procédure de post-traitement se base sur un modèle MILP où seul le transfert, la filtration, le choix du bac pour le stockage de P_1 à la station terminale et la laverie w_2 sont pris en compte. L'objectif du modèle est de minimiser le nombre de changements de décisions d'ordonnancement, tout en maintenant des calculs précis des niveaux de stock et en respectant les contraintes de gestion de la contamination dans les bacs. L'objectif est de lisser les courbes des niveaux de stock pour refléter de près les opérations réelles, en réduisant le nombre de changements d'état des opérations.

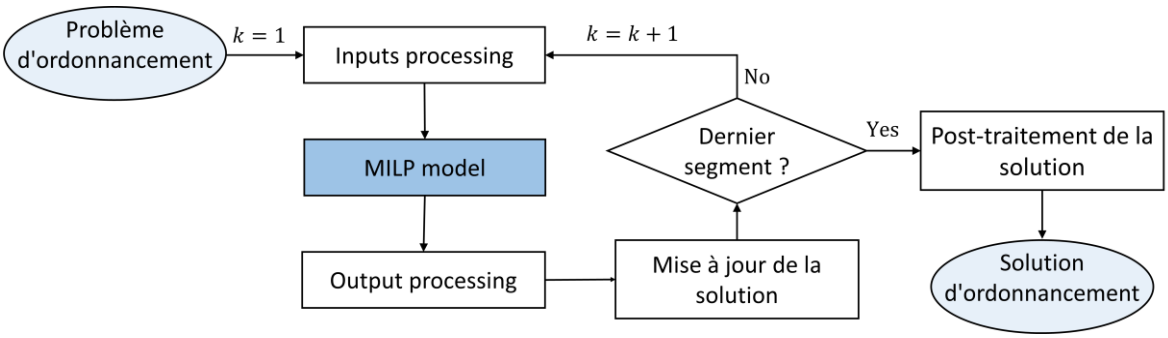


Figure 5.3. Organigramme de la solution d'ordonnancement

Pour un segment donné k de l'horizon d'ordonnancement, la solution d'ordonnancement d'un pipeline n est déterminée en définissant les décisions d'injection du temps TS à TPF_n. Comme présenté dans la Figure 5.4, les périodes $t \in \{1, \dots, TS-1\}$ dans H_0 sont considérées pour l'initialisation des pipelines avec les décisions d'injection prises avant TS en plus de l'initialisation des laveries avec les décisions d'ordonnancement précédentes. Le déchargement des produits présents dans le pipeline n est calculé en fonction des décisions d'injection en plus des arrêts pris pendant l'horizon d'ordonnancement. Pour calculer l'impact des lots présents dans le pipeline principal n_{NM} sur la station de terminale après $TM - TT_{NM}$, un déchargement

complet du pipeline est effectué pendant H_2, en tenant compte des arrêts programmés pendant la totalité de l'horizon d'ordonnancement. Pour les pipelines secondaires $n = \{1, \dots, NM-1\}$, les décisions d'injection sont considérées jusqu'à $TPF_n = TM - TT_{NM} - TT_n$ et la dernière décision de déchargement est considérée jusqu'à $TPL_n = TM - TT_{NM}$.

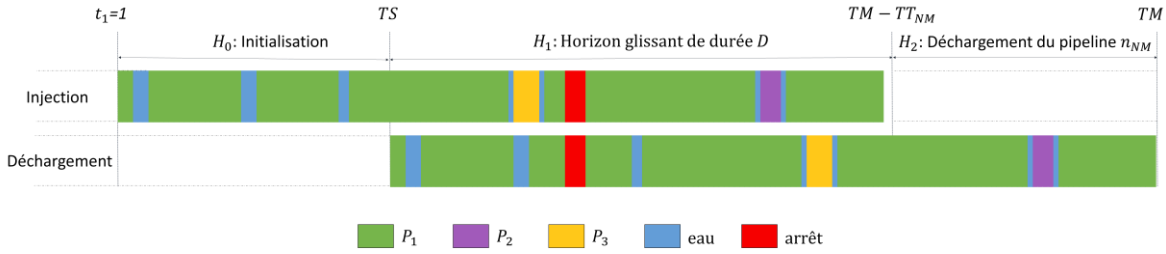


Figure 5.4. Décomposition d'un segment de l'horizon glissant

2.3. Modèle mathématique

2.3.1. Fonction objectif

La fonction objectif du modèle, présentée sous la forme de l'équation (5.1), comprend deux composantes. La première composante, montrée dans l'équation (5.2), calcule la somme des volumes totaux pondérés des ruptures des produits. La deuxième composante, présentée dans l'équation (5.3), calcule la somme des volumes pondérés d'eau injectée dans les pipelines, à partir du début de l'horizon d'ordonnancement TS.

$$minimiser \ (f_1 + f_2) \tag{5.1}$$

où:

$$f_1 = \sum_{t=TS}^{TM} \sum_{p \in P} WC_p \times ps_{p,t} \tag{5.2}$$

$$f_2 = \sum_{n \in N} \sum_{t=TS}^{TPF_n} WC_{PM+2} \times \tau \times PF_n \times c_{n,PM+2,t} \tag{5.3}$$

Assurer un approvisionnement continu du produit P_1 est important pour le fonctionnement ininterrompu des unités de traitement chimique à la station terminale.

Par conséquent, le volume de rupture du produit P_1 se voit attribuer le poids le plus élevé.

2.3.2. Contraintes de suivi des lots

L'ordonnancement d'un pipeline n est établi par la détermination de deux ensembles de variables : les variables d'injection $c_{n,a,t}$ et les variables de déchargement $d_{n,a,t}$. Pour chaque intervalle de temps $t \in \{TS, \dots, TPL_n\}$, une décision d'ordonnancement $a \in APU_{\mathrm{WM}+n}$ est déterminée.

La relation entre les variables d'injection et de déchargement est définie dans l'équation (5.4), stipulant que le déchargement d'un produit ou de l'eau à une certaine période dépend à la fois de son injection à une période précédente $TT_n - j$, ajustée pour le temps de transport TT_n et la somme des arrêts j, et de la variable $z_{n,t,j}$.

$\forall\, n \in N, a \in APU_{WM+n}\backslash\{PM+1\}, t \in \{TS, \dots, TPL_n\}, j \in \{0, \dots, 1 + MSD_n\}$:

$$d_{n,a,t} \geq c_{n,a,t-TT_n-j} + z_{n,t,j} - 1 \qquad (5.4)$$

De plus, les équations (5.5) à (5.7) définissent la variable binaire $z_{n,t,j}$, qui est définie à 1 si, et seulement si, les arrêts cumulatifs sur $\{t - TT_n - j, \dots, t - 1\}$ égalent j, et qu'aucun arrêt n'est programmé à t et $t - TT_n - j$. Sinon, $z_{n,t,j}$ est défini à 0.

L'équation (5.8) définit $z_{n,t,0}$ à 1 s'il n'y a pas d'arrêts programmés pendant t et si la somme de toutes les valeurs de $z_{n,t,j}$ de 1 à $MSD_n + 1$ est égale à 0 ; dans tous les autres scénarios, $z_{n,t,0}$ est 0.

$\forall\, n \in N, t \in \{TS, \dots, TPL_n\}, j \in \{1, \dots, 1 + MSD_n\}$:

$$z_{n,t,j} \times j + (j + \sigma) \times {y^+}_{n,t,j} \leq \sum_{v=t-TT_n-j}^{t-1} c_{n,PM+1,v} + (c_{n,PM+1,t} + c_{n,PM+1,t-TT_n-j}) \times \frac{M}{10} \qquad (5.5)$$

$$\sum_{v=t-TT_n-j}^{t-1} c_{n,PM+1,v} + (c_{n,PM+1,t} + c_{n,PM+1,t-TT_n-j}) \times \frac{M}{10} \leq (j - \sigma) \times {y^-}_{n,t,j} + z_{n,t,j} \times j + M \times {y^+}_{n,t,j} \qquad (5.6)$$

$$y^{+}_{n,t,j} + z_{n,t,j} + y^{-}_{n,t,j} = 1 \qquad (5.7)$$

$$1 - z_{n,t,0} \leq M \times c_{n,PM+1,t} + \sum_{j=1}^{MSD_n+1} z_{n,t,j} \qquad (5.8)$$

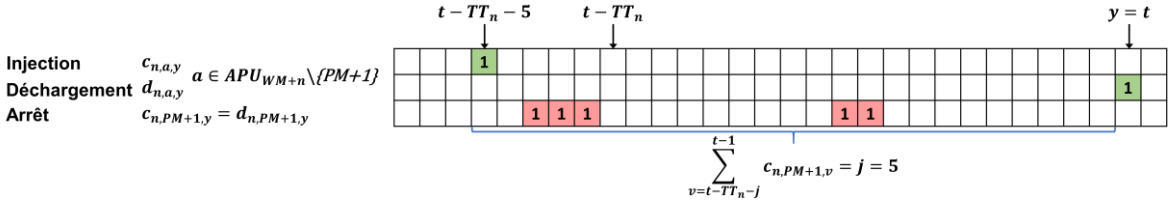


Figure 5.5. Exemple de $c_{n,i,t-TT_n-j} = 1$, $z_{s,t,j} = 1$ *et* $d_{s,i,t} = 1$.

La Figure 5.5 illustre une application de la contrainte présentée dans l'équation (5.4) pour une décision d'ordonnancement $a \in APU_{WM+n}$ à l'exclusion de la décision d'arrêt *PM+1*. Si la somme des arrêts de $t - TT_n - 5$ à $t - 1$ est égale à $j = 5$ et qu'aucun arrêt n'est programmé pendant t et $t - TT_n - 5$, alors $z_{n,t,5} = 1$. Par conséquent, la contrainte garantit que $d_{n,a,t} \geq c_{n,a,t-TT_n-5} + z_{n,t,5} - 1 \geq 1$.

2.3.3. Contraintes d'arrêts des pipelines

Le modèle MILP prend en compte les arrêts, y compris ceux prédéfinis comme intervalles de maintenance et ceux programmés au cours de l'horizon d'ordonnancement. Lorsqu'un arrêt est programmé pendant t (indiqué par $c_{n,PM+1,t} = 1$), la variable de déchargement $d_{n,PM+1,t}$ est définie à 1, correspondant au statut d'arrêt entre les deux variables comme présenté dans l'équation (5.9) :

$$d_{n,PM+1,t} = c_{n,PM+1,t} \qquad \forall n \in N, t \in \{TS, \dots, TPL_n\} \qquad (5.9)$$

Les arrêts, en particulier pour le pipeline principal, entraînent des coûts opérationnels supplémentaires significatifs. Par conséquent, certains pipelines sont interdits de programmer des arrêts en dehors des intervalles de maintenance prédéfinis ($ST_n = 1$). L'équation (5.10) impose qu'au moins une décision dans $a \in APU_{WM+n}$ à l'exclusion de *PM+1* (impliquant une injection de produit ou d'eau) doit avoir lieu pendant t si un arrêt n'est pas programmé. Cette contrainte garantit une opération continue du pipeline sauf si un arrêt de maintenance est prédéfini. Pour les pipelines

où $ST_n = 0$, les arrêts peuvent survenir pendant n'importe quel intervalle de temps de l'horizon d'ordonnancement.

$\forall\, n \in N, t \in \{TS, \dots, TPF_n\}$:

$$\sum_{a \in APU_{WM+n} \setminus \{PM+1\}} c_{n,a,t} \geq ST_n - PIN_{WM+n,1+PM,t} \qquad (5.10)$$

Pour limiter le nombre de variables et réduire la charge computationnelle, l'équation (5.11) limite le nombre maximal d'intervalles d'arrêt autorisés pendant l'horizon d'ordonnancement pour les pipelines qui permettent des arrêts en dehors des périodes de maintenance ($ST_n = 0$).

$$\sum_{t=TS}^{TPL_n} c_{n,PM+1,t} \leq MSD_n \qquad \forall\, n \in N, if\ ST_n = 0 \qquad (5.11)$$

2.3.4. Contraintes d'unicité des décisions

Pour garantir l'intégrité opérationnelle et prévenir les conflits logistiques, le modèle impose l'ordonnancement d'une seule décision d'injection et de déchargement dans un intervalle de temps donné, comme détaillé dans les équations (5.12) et (5.13). Dans l'équation (5.14), une seule décision d'ordonnancement peut être planifiée dans une laverie à un intervalle de temps donné. De même, l'équation (5.15) applique une restriction à l'unité de filtration, permettant le traitement d'au plus un produit pendant un intervalle de temps donné.

De plus, dans les cas où un bac de stockage $S_{m,s}$ est partagé entre différents produits sur l'horizon d'ordonnancement (comme indiqué par $\left|APS_{m,s}\right| > 1$), comme présenté dans l'équation (5.16), un seul produit est autorisé à être stocké dans $S_{m,s}$ à un intervalle de temps donné pour éviter toute contamination des produits.

$$\sum_{a \in APU_{WM+n}} c_{n,a,t} = 1 \qquad \forall\, n \in N, t \in \{TS, \dots, TPF_n\} \qquad (5.12)$$

$$\sum_{a \in APU_{WM+n}} d_{n,a,t} = 1 \qquad \forall\, n \in N, t \in \{TS, \dots, TPL_n\} \qquad (5.13)$$

$$\sum_{a \in APU_q} yw_{q,a,t} = 1 \qquad \forall\, q \in WS, t \in \{TS, \dots, TWL_q\} \qquad (5.14)$$

$$\sum_{dp \in DP} fl_{dp,t} \leq 1 \qquad \forall\, t \in \{TS, \dots, TM\} \qquad (5.15)$$

$\forall\, m \in M, s \in S_m, t \in \{TS, \dots, TML_m\}\ if\ \left|APS_{m,s}\right| > 1$:

$$\sum_{b \in APS_{m,s}} qst_{m,s,b,t} = 1 \qquad (5.16)$$

2.3.5. Contraintes d'initialisation

La Figure 5.6 illustre la décomposition de l'horizon d'ordonnancement pour les opérations d'injection et de déchargement du pipeline n. Les intervalles de temps $\{1, TS-1\}$, avant le début de l'horizon d'ordonnancement, sont réservés à l'initialisation des opérations d'injection dans le pipeline. TPF_n est la dernière période considérée pour les opérations d'injection, tandis que les périodes de TPF_n à TPL_n sont allouées pour le déchargement complet des lots contenus dans le pipeline n à TPF_n. L'état initial du pipeline n à TS et les intervalles de temps prédéfinis pour la maintenance préventive sont définis par les paramètres binaires $PIN_{WM+n,a,t}$.

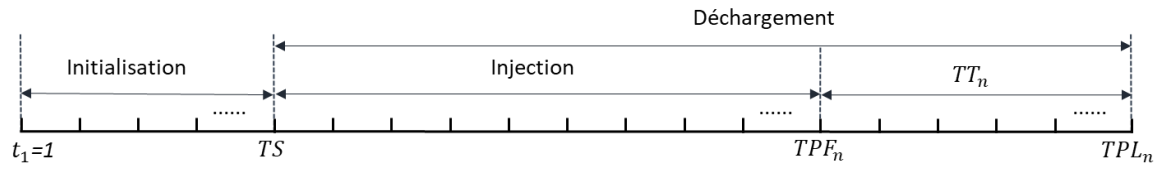


Figure 5.6. Aperçu schématique de la décomposition de l'horizon d'ordonnancement du pipeline n

L'équation (5.17) est introduite pour initialiser les variables $c_{n,a,t}$ avec les informations sur les lots qui ont été injectés dans le pipeline n avant le début de l'horizon d'ordonnancement TS. L'équation (5.18) impose que les opérations d'injection résiduelles soient achevées après TS ainsi que toute maintenance préventive.

$$c_{n,a,t} = PIN_{WM+n,a,t} \qquad \forall\, n \in N, a \in APU_{WM+n}, t \in \{1, \dots, TS-1\} \qquad (5.17)$$

$$c_{n,a,t} \geq PIN_{WM+n,a,t} \qquad \forall\, n \in N, a \in APU_{WM+n}, t \in \{TS, \dots, TPL_n\} \qquad (5.18)$$

Étant donné le délai entre l'injection et le déchargement des lots pour un pipeline n, l'équation (5.19) spécifie qu'aucune décision d'injection ne doit être prise pour les intervalles de temps $t \in \{TPF_n + 1, \dots, TPL_n\}$, car toute opération d'injection dans cette fenêtre ne s'alignerait pas avec l'horizon d'ordonnancement puisqu'elle nécessiterait une opération de déchargement au-delà de la fin de l'horizon d'ordonnancement. Pour les intervalles de maintenance spécifiquement, $c_{n,a,t}$ est contraint à égaler 1 pour permettre l'intégration des périodes de maintenance comme indiqué par la combinaison des équations (5.18) et (5.19).

$$c_{n,a,t} \leq PIN_{WM+n,a,t} \qquad \forall\, n \in N, a \in APU_{WM+n}, t \in \{TPF_n + 1, \dots, TPL_n\} \quad (5.19)$$

L'initialisation des décisions dans les laveries avant le début de l'horizon d'ordonnancement TS est présentée dans l'équation (5.20). Cette considération est cruciale pour respecter la taille minimale des lots et les contraintes de changement de produit étant donné que les décisions d'ordonnancement précédentes des laveries impactent le début de chaque nouveau segment d'ordonnancement glissant. L'équation (5.21) traite ensuite des décisions d'ordonnancement prédéfinies qui continuent au-delà de TS, y compris les intervalles de temps de maintenance préventive. De plus, l'équation (5.22) impose qu'aucune nouvelle décision d'ordonnancement pour les laveries n'est nécessaire après TWL_q. Les variables $yw_{q,a,t}$ définies après TWL_q sont des variables structurelles, principalement utilisées dans le calcul des niveaux de stock.

$$\forall\, q \in WS, a \in APU_q, t \in \left\{TS - \max_{v \in APU_q}(PB_{q,v}), \dots, TS - 1\right\}:$$

$$yw_{q,a,t} = PIN_{q,a,t} \quad (5.20)$$

$$\forall\, q \in WS, a \in APU_q, t \in \{TS, \dots, TWL_q\}:$$

$$yw_{q,a,t} \geq PIN_{q,a,t} \quad (5.21)$$

$$\forall\, q \in WS, a \in APU_q, t \in \{TWL_q + 1, \dots, TM - TT_{NM}\}\ if\ TWL_q < TM - TT_{NM}:$$

$$yw_{q,a,t} = 0 \quad (5.22)$$

2.3.6. Durées minimales des décisions

Une fois qu'une décision d'ordonnancement a est planifiée dans un pipeline ou dans une laverie u pendant t, la décision doit être maintenue pendant au moins $PB_{u,a}$ intervalles de temps. Cette contrainte garantit le respect des contraintes de taille minimale des lots pour les produits et des contraintes de durée minimale pour les arrêts. Pour l'eau, il n'y a pas d'exigence de taille minimale des lots. Pour les pipelines, l'équation (5.23) garantit que $c_{n,a,t} = 1$ si la décision a été planifiée pendant $t-1$ et qu'aucune décision différente v où $(v \neq a)$ n'a été prise pendant un intervalle compris entre $\{t - PB_{WM+n,a}, \dots, t-2\}$. Cette condition garantit la continuité de la décision a sur la période de temps requise.

$\forall\, n \in N, a \in APU_{WM+n} \backslash \{PM+2\}, t \in \{TS, \dots, TPF_n\}, t' \in \{t - PB_{WM+n,a}, \dots, t-2\}$:

$$c_{n,a,t} \geq c_{n,a,t-1} + \sum_{v \in APU_{WM+n} \backslash \{PM+2\}}^{v \neq a} c_{n,v,t'} - 1 \qquad (5.23)$$

Pour les laveries, l'équation (5.24) applique une logique similaire à l'équation (5.23). $yw_{q,a,t} = 1$ si la décision a a été prise à $t-1$ et qu'aucune décision différente v n'a été prise pendant un intervalle compris entre $\{t - PB_{q,a}, \dots, t-2\}$, garantissant la continuité de la décision a sur au moins $PB_{q,a}$ intervalles de temps.

$\forall\, q \in WS, a \in APU_q, t \in \{TS, \dots, TWL_q\}, t' \in \{t - PB_{q,a}, \dots, t-2\}$:

$$yw_{q,a,t} \geq yw_{q,a,t-1} + \sum_{v \in APU_q}^{v \neq a} yw_{q,v,t'} - 1 \qquad (5.24)$$

2.3.7. Contraintes de changement de produit

Pour éviter le mélange de différents lots de produits dans les pipelines, une quantité d'eau est injectée entre deux lots consécutifs, garantissant une séparation physique entre les différents produits. De plus, l'eau est également utilisée avant et après chaque arrêt de pipeline comme mesure pour aider au redémarrage des pompes à la station de tête. Dans l'équation (5.25), si une décision d'ordonnancement d'injection a autre que l'eau est planifiée pendant $t-1$ ($c_{n,a,t-1} = 1$), une seule et unique des

décisions d'ordonnancement suivantes peut être prise : soit la planification de la même décision a ($c_{n,a,t} = 1$), soit de l'eau ($c_{n,PM+2,t} = 1$) pendant t , imposant l'ordonnancement de l'eau pour séparer deux lots de produits différents et planifiant un lot d'eau avant et après un arrêt.

$\forall\, n \in N, a \in APU_{WM+n} \backslash \{PM+2\}, t \in \{TS, \dots, TPF_n\}$:

$$c_{n,a,t-1} \leq c_{n,a,t} + c_{n,PM+2,t} \tag{5.25}$$

Dans le cas d'un changement de produit dans une laverie q, une période de configuration doit être respectée. Dans l'équation (5.26), si a est planifiée à $t-1$ dans la laverie q, une seule des décisions suivantes peut être prise : la planification de la même décision a ou un arrêt pendant t. Les équations (5.24) et (5.26) garantissent l'ordonnancement d'un arrêt respectant la durée minimale autorisée avant chaque changement de produit.

2.3.8. Gestion des bacs multiproduits

La variable binaire $qst_{m,s,b,t}$ indique si le produit $b \in APS_{m,s}$ est contenu dans le bac $S_{m,s}$ pendant t. En plus de $vmt_{m,s,t}$, les deux variables sont cruciales pour surveiller le produit stocké dans les bacs et la possibilité de changement de produit sans risque de contamination.

Un produit ne peut être injecté dans un pipeline que s'il est physiquement disponible à la station d'origine comme détaillé dans les équations 5.27 à 5.29. De plus, un produit ne peut être traité par l'unité de filtration que s'il est disponible dans le bac $S_{4,3}$ comme présenté dans l'équation 5.30.

$$qst_{1,1,b,t} \geq c_{1,b,t} \qquad \forall\, b \in APS_{1,1},\ t \in \{TS, \dots, TML_1\}, if\ |APS_{1,1}| > 1 \tag{5.27}$$

$$qst_{2,1,b,t} \geq c_{2,b,t} \qquad \forall\, b \in APS_{2,1},\ t \in \{TS, \dots, TML_2\}, if\ |APS_{2,1}| > 1 \tag{5.28}$$

$$qst_{3,2,b,t} \geq c_{3,b,t} \qquad \forall\, b \in APS_{3,2},\ t \in \{TS, \dots, TML_3\}, if\ |APS_{3,2}| > 1 \tag{5.29}$$

$$qst_{4,3,b,t} \geq fl_{b,t} \qquad \forall\, b \in APS_{4,3},\ t \in \{TS, \dots, TML_4\}, if\ |APS_{4,3}| > 1 \tag{5.30}$$

Lorsqu'une laverie ou un pipeline décharge le produit b dans le bac $S_{m,s}$ pendant t, la variable $qst_{m,s,b,t}$ est définie à 1, indiquant que le produit b est présent dans le bac pendant t. Les équations de 5.31 à 5.37 présentent toutes les contraintes de mise à jour des produits dans les bacs.

$\forall\, b \in APS_{1,1} \cap APU_1,\ t \in \{TS, \dots, TML_1\}, if\ |APS_{1,1}| > 1$:

$$qst_{1,1,b,t} \geq yw_{1,b,t} \tag{5.31}$$

$\forall\, b \in APS_{2,1} \cap APU_2,\ t \in \{TS, \dots, TML_2\}, if\ |APS_{2,1}| > 1$:

$$qst_{2,1,b,t} \geq yw_{2,b,t} \tag{5.32}$$

$\forall\, b \in APS_{3,2} \cap APU_{WM+1},\ t \in \{TS, \dots, TML_3\}, if\ |APS_{3,2}| > 1$:

$$qst_{3,2,b,t} \geq d_{1,b,t} \tag{5.33}$$

$\forall\, b \in APS_{3,2} \cap APU_{WM+2},\ t \in \{TS, \dots, TML_3\}, if\ |APS_{3,2}| > 1$:

$$qst_{3,2,b,t} \geq d_{2,b,t} \tag{5.34}$$

$\forall\, b \in APS_{3,2} \cap APU_3,\ t \in \{TS, \dots, TML_3\}, if\ |APS_{3,2}| > 1$:

$$qst_{3,2,b,t} \geq yw_{3,b,t} \tag{5.35}$$

$\forall\, b \in APS_{3,2} \cap APU_4,\ t \in \{TS, \dots, TML_3\}, if\ |APS_{3,2}| > 1$:

$$qst_{3,2,b,t} \geq yw_{4,b,t} \tag{5.36}$$

$\forall\, b \in APS_{4,3} \cap APU_{WM+3},\ t \in \{TS, \dots, TML_4\}, if\ |APS_{4,3}| > 1$:

$$qst_{4,3,b,t} \geq d_{3,b,t} \tag{5.37}$$

Pour éviter la contamination dans le bac $S_{m,s}$ à t, le changement de produit n'est autorisé que si le bac est vide. Dans le contexte de ce modèle discret, un bac est considéré comme vide et prêt pour le changement de produit si son niveau de stock à t est inférieur à un seuil prédéfini relativement petit $VMTQ_{m,s}$. La variable binaire

$mst_{m,s,t}$ est introduite pour la condition suivante : si le niveau de stock dans $S_{m,s}$ est supérieur à $VMTQ_{m,s}$, $mst_{m,s,t}$ est défini à 0 ; sinon, $mst_{m,s,t}$ peut être égal à 1. Les équations de 5.38 à 5.41 détaillent la définition des variables $mst_{m,s,t}$.

$\forall \{m,s\} \in \{\{1,1\},\{2,1\},\{3,2\},\{4,3\}\},\ b \in APS_{m,s},\ if\ |APS_{m,s}| > 1$:

$$VMTQ_{m,s} - VMTO_{m,s} \leq M \times mst_{m,s,TS} \quad (5.38)$$

$$1 + \frac{VMTQ_{m,s} - VMTO_{m,s}}{M} \geq mst_{m,s,TS} \quad (5.39)$$

$\forall\ t \in \{TS+1, \dots, TML_m\}$:

$$VMTQ_{m,s} - vmt_{m,s,t-1} \leq M \times mst_{m,s,t} \quad (5.40)$$

$\forall\ t \in \{TS+1, \dots, TML_m\}$:

$$1 + \frac{VMTQ_{m,s} - vmt_{m,s,t-1}}{M} \geq mst_{m,s,t} \quad (5.41)$$

Comme décrit dans l'équation 5.43, si le produit b est stocké dans le bac $S_{m,s}$ à $t-1$ et que le niveau de stock dépasse $VMTQ_{m,s}$ (rendant $mst_{m,s,t} = 0$), alors le bac $S_{m,s}$ continue de stocker le produit b à t. Cela signifie qu'un changement de produit dans le bac $S_{m,s}$ ne peut se produire que lorsque $mst_{m,s,t} = 1$, indiquant que le niveau de stock est inférieur au seuil $VMTQ_{m,s}$ et donc considéré comme suffisamment vide. L'équation 5.42 applique la même logique que l'équation 5.43 pour le début de l'horizon d'ordonnancement TS.

$\forall \{m,s\} \in \{\{1,1\},\{2,1\},\{3,2\},\{4,3\}\},\ b \in APS_{m,s},\ if\ |APS_{m,s}| > 1$:

$$qst_{m,s,b,TS} \geq OS_{m,s,b} - mst_{m,s,TS} \quad (5.42)$$

$\forall\ t \in \{TS+1, \dots, TML_m\}$:

$$qst_{m,s,b,t} \geq qst_{m,s,b,t-1} - mst_{m,s,t} \quad (5.43)$$

2.3.9. Contraintes sur la gestion des niveaux de stock

En raison de la forte demande de produit P_1 par rapport aux autres produits, deux bacs sont affectés à son stockage à la station terminale : $S_{4,1}$, qui est directement relié aux unités de traitement chimique, et $S_{4,2}$, qui est relié à $S_{4,1}$ via un pipeline de transfert. Par conséquent, pour chaque période de temps t, il est nécessaire de spécifier le bac dans lequel P_1 est déchargé. Pour résoudre ce problème, la variable binaire lpr_t est utilisée, définie à 1 si P_1 est déchargé dans $S_{4,1}$ pendant t ; si P_1 est dirigé vers le bac de transfert $S_{4,2}$, alors lpr_t est défini à 0.

La variable binaire $lprd_t$ est introduite pour linéariser le produit de la variable de déchargement de P_1 par le pipeline principal $d_{NM,1,t}$, et la variable lpr_t, comme définie par les équations 5.44 à 5.46. $lprd_t$ est utilisé pour les calculs des niveaux des stocks de $S_{4,1}$ et $S_{4,2}$.

$\forall\, t \in \{TS, \dots, TM\}$:

$$lprd_t \leq d_{NM,1,t} \tag{5.44}$$

$$lprd_t \leq lpr_t \tag{5.45}$$

$$lprd_t \leq d_{NM,1,t} + lpr_t - 1 \tag{5.46}$$

Les calculs des niveaux de stocks pour chaque temps t sont déterminés en fonction des niveaux de stock dans les bacs de la période précédente $t-1$, plus ce qui est déchargé depuis les laveries, pipelines, et de l'unité de filtration, et moins ce qui est chargé dans les pipelines et ce qui est consommé par les clients et traité par l'unité de filtration, comme détaillé dans les équations 5.47 à 5.62. Pour les bacs $S_{4,1}, S_{5,2}, \dots, S_{5,PM}$ qui sont reliés aux clients, les niveaux de stocks et les ruptures des produits à chaque instant t sont calculés en utilisant les fonctions min() et max().

$\forall\, m \in \{1,2\},\ s \in S_m$:

$$vmt_{m,s,TS} = VMTO_{m,s} + \sum_{b \in APS_{m,s}} (yw_{m,b,TS} \times QR_{m,b} - c_{m,b,TS} \times PF_m) \times \tau \tag{5.47}$$

$\forall\, t \in \{TS+1, \dots, TML_m\}$:

$$vmt_{m,s,t} = vmt_{m,s,t-1} + \sum_{b \in APS_{m,s}} (yw_{m,b,t} \times QR_{m,b} - c_{m,b,t} \times PF_m) \times \tau \quad (5.48)$$

$\forall\, m \in \{3\},\ s \in S_m$:

$$vmt_{m,s,TS} = VMTO_{m,s} + \sum_{b \in APS_{m,s}} (\sum_{n \in \{1,2\}} d_{n,b,TS} \times PF_n + \sum_{q \in \{3,4\}} yw_{q,b,TS} \times QR_{q,b} - c_{3,b,TS} \times PF_3) \times \tau \quad (5.49)$$

$\forall\, t \in \{TS+1, \dots, TML_m\}$:

$$vmt_{m,s,t} = vmt_{m,s,t-1} + \sum_{b \in APS_{m,s}} (\sum_{n \in \{1,2\}} d_{n,b,t} \times PF_n + \sum_{q \in \{3,4\}} yw_{q,b,t} \times QR_{q,b} - c_{3,b,t} \times PF_3) \times \tau \quad (5.50)$$

$\forall\, m \in \{4\}$:

$$vmt_{m,1,TS} = max\,(VMTO_{m,1} + (lprd_{TS} \times PF_3 + tr_{TS} \times TFU) \times \tau - PD_{1,TS}, 0) \quad (5.51)$$

$$vmt_{m,2,TS} = VMTO_{m,2} + \big((d_{3,1,TS} - lprd_{TS}) \times PF_3 - tr_{TS} \times TFU\big) \times \tau \quad (5.52)$$

$$vmt_{m,3,TS} = VMTO_{m,3} + \sum_{b \in APS_{m,3}} (d_{3,b,TS} \times PF_3 - fl_{b,TS} \times FFU) \times \tau \quad (5.53)$$

$$ps_{1,TS} = -min\,(VMTO_{m,1} + (lprd_{TS} \times PF_3 + tr_{TS} \times TFU) \times \tau - PD_{1,TS}, 0) \quad (5.54)$$

$\forall\, t \in \{TS+1, \dots, TML_m\}$:

$$vmt_{m,1,t} = max\,(vmt_{m,1,t-1} + (lprd_t \times PF_3 + tr_t \times TFU) \times \tau - PD_{1,t}, 0) \quad (5.55)$$

$$vmt_{m,2,t} = vmt_{m,2,t-1} + \big((d_{3,1,t} - lprd_t) \times PF_3 - tr_t \times TFU\big) \times \tau \quad (5.56)$$

$$vmt_{m,3,t} = vmt_{m,3,t-1} + \sum_{b \in APS_{m,3}} (d_{3,b,t} \times PF_3 - fl_{b,t} \times FFU) \times \tau \quad (5.57)$$

$$ps_{1,t} = -min\,(vmt_{m,1,t-1} + (lprd_t \times PF_3 + tr_t \times TFU) \times \tau - PD_{1,t}, 0) \quad (5.58)$$

$\forall\, m \in \{5\},\ s \in S_m$:

$$vmt_{m,s,TS} = max\,(VMTO_{m,s} + \sum_{b \in APS_{m,s}} fl_{b,TS} \times FFU \times \tau - PD_{b,TS}, 0) \quad (5.59)$$

$$\sum_{b\in APS_{m,s}} ps_{b,TS} = -min\left(VMTO_{m,s} + \sum_{b\in APS_{m,s}} fl_{b,TS} \times FFU \times \tau - PD_{b,TS}, 0\right) \quad (5.60)$$

$\forall\, t \in \{TS+1, \dots, TML_m\}$:

$$vmt_{m,s,t} = max\left(vmt_{m,s,t-1} + \sum_{b\in APS_{m,s}} fl_{b,t} \times FFU \times \tau - PD_{b,t}, 0\right) \quad (5.61)$$

$$\sum_{b\in APS_{m,s}} ps_{b,t} = -min\left(vmt_{m,s,t-1} + \sum_{b\in APS_{m,s}} fl_{b,t} \times FFU \times \tau - PD_{b,t}, 0\right) \quad (5.62)$$

Les fonctions min() et max(), présentées dans les équations 5.51, 5.54, 5.55, 5.58, 5.59, 5.60, 5.61, et 5.62, sont linéarisées comme détaillé dans les équations 5.63 à 5.72. Dans ce processus de linéarisation, la variable x représente le niveau de stock d'un bac donné à déterminer à un instant donné t, tandis que y représente la quantité relative de rupture. Q désigne la somme du niveau de stock du bac à l'instant $t-1$, en plus des quantités ajoutées et soustraites du bac. De plus, la variable binaire bi est introduite pour aider dans le processus de linéarisation.

$$x = max(Q, 0) \quad (5.63) \qquad y = -min(Q, 0) \quad (5.68)$$

$$x \geq Q \quad (5.64) \qquad y \leq Q \quad (5.69)$$

$$x \geq 0 \quad (5.65) \qquad y \leq 0 \quad (5.70)$$

$$x \leq Q + M \times (1 - bi) \quad (5.66) \qquad y \geq Q - M \times bi \quad (5.71)$$

$$x \leq M \times bi \quad (5.67) \qquad y \geq -M \times (1 - bi) \quad (5.72)$$

Les niveaux de stock de tous les bacs à chaque instant t doivent être maintenus dans des limites minimale et maximale spécifiées, comme présenté dans les équations 5.73 et 5.74. Pour des raisons de simplification et sans perte de généralité, seule la capacité utile des bacs est considérée. Par conséquent, $VMTA_{m,s}$ se voit attribuer une valeur de zéro, ignorant toute capacité inutilisable.

$$vmt_{m,s,t} \geq VMTA_{m,s} \qquad \forall\, m \in M,\ s \in S_m, t \in \{TS, \dots, TML_m\} \quad (5.73)$$

$$vmt_{m,s,t} \leq VMTI_{m,s} \qquad \forall\, m \in M,\ s \in S_m, t \in \{TS, \dots, TML_m\} \quad (5.74)$$

2.4. Post-traitement

Après que la solution globale d'ordonnancement est établie pour l'ensemble de l'horizon d'ordonnancement glissant, un algorithme de post-traitement basé sur un modèle MILP affine cette solution. Étant donné que les contraintes de durée minimale d'ordonnancement ne sont pas imposées pour les unités de transfert et de filtration, les solutions globales entraînent une fréquence relativement élevée de changements d'état pour ces unités. Cela conduit à la génération de graphiques de niveaux de stock irréguliers pour les bacs $S_{4,1}$, $S_{4,2}$ et $S_{4,3}$ à la station terminale. De plus, malgré l'incorporation de contraintes de durée minimale pour les décisions de production à la laverie w_2, les solutions entraînent toujours un nombre élevé de changements d'état, ce qui entraîne une sous-utilisation de la capacité du bac $S_{2,1}$.

Le modèle MILP de post-traitement intègre certaines des contraintes mentionnées précédemment. Sa distinction réside dans le fait qu'il considère certaines des variables présentées précédemment comme des paramètres issus de la solution globale, à l'exception des variables associées à la laverie w_2, les variables de transfert tr_t, les variables de filtration $fl_{dp,t}$, et les variables définissant le déchargement de P_1 à la station terminale (lpr_t et $lprd_t$), ainsi que toutes les variables des bacs influencées par les variables susmentionnées. L'objectif est de minimiser le nombre total de changements de décisions d'ordonnancement pour $yw_{2,a,t}$, tr_t, $fl_{dp,t}$ et lpr_t tout au long de l'horizon d'ordonnancement.

Pour calculer le nombre total de changements de décisions d'ordonnancement sur l'horizon d'ordonnancement, de nouvelles variables, $dc_{v,t}$, sont introduites. Une valeur de $dc_{v,t}$ de 1 indique un changement d'état pour l'unité v à l'instant t par rapport à $t-1$. Ces calculs sont applicables pour la laverie w_2 ($v=1$), l'unité de transfert ($v=2$), l'unité de filtration ($v=3$), et la sélection du bac P_1 à la station terminale (lpr_t) ($v=4$), avec les équations 5.75 à 5.81 détaillant les calculs de $dc_{v,t}$.

$\forall\, a \in APU_2, t \in \{TS, \dots, TML_2 + (KM-1) \times R\}$:

$$dc_{1,t} \geq yw_{2,a,t} + \sum_{v \in APU_2}^{v \neq a} yw_{2,v,t-1} - 1 \qquad (5.75)$$

$\forall\, t \in \{TS, \dots, TM + (KM-1) \times R\}$:

$$dc_{2,t} \geq tr_t - tr_{t-1} \tag{5.76}$$

$$dc_{2,t} \geq tr_{t-1} - tr_t \tag{5.77}$$

$\forall\, dp \in DP, t \in \{TS, \dots, TM + (KM-1) \times R\}$:

$$dc_{3,t} \geq fl_{dp,t} + \sum_{v \in DP}^{v \neq dp} fl_{v,t-1} - 1 \tag{5.78}$$

$$dc_{3,t} \geq fl_{dp,t} - \sum_{v \in DP} fl_{v,t-1} \tag{5.79}$$

$\forall\, t \in \{TS, \dots, TM + (KM-1) \times R\}$:

$$dc_{4,t} \geq lpr_t - lpr_{t-1} \tag{5.80}$$

$$dc_{4,t} \geq lpr_{t-1} - lpr_t \tag{5.81}$$

La fonction objectif pour le modèle MILP de post-traitement, présentée dans l'équation 5.82, comprend deux éléments : la somme des volumes totaux pondérés des ruptures des produits, calculée dans l'équation 5.83, et la somme des changements de décisions d'ordonnancement pour les quatre unités susmentionnées, détaillée dans l'équation 5.84.

$$minimiser(f_3 + f_4) \tag{5.82}$$

où:

$$f_3 = \sum_{t=TS}^{TM+(KM-1)\times R} \sum_{p \in P} WC_p \times ps_{p,t} \tag{5.83}$$

$$f_4 = \sum_{t=TS}^{TML_2+(KM-1)\times R} dc_{1,t} + \sum_{v=2}^{4} \sum_{t=TS}^{TM+(KM-1)\times R} dc_{v,t} \tag{5.84}$$

3. EXPERIENCES NUMERIQUES

L'approche de solution présentée précédemment a été testée en utilisant des données réelles. Les expériences numériques ont été menées sur un PC avec deux

processeurs AMD EPYC 7452 32-Core et 500 Go de RAM sous Linux (Ubuntu 20.04.5), et les instances ont été résolues en utilisant Gurobi 11.0.0 avec la configuration par défaut. Le nombre de threads est limité à 64. Cette section commence par une présentation de l'étude de cas et la génération de scénarios, suivie d'une analyse des résultats et une évaluation de la performance de l'approche de solution. Les instances et les résultats de l'étude sont mis à disposition pour référence.

3.1. Instances

Pour évaluer la performance de l'approche de solution proposée, dix scénarios ont été générés en utilisant des ensembles de données réelles provenant de la chaîne de valeur du Groupe OCP. Ces scénarios incluent un horizon d'ordonnancement glissant de $KM = 7$ jours. De plus, l'horizon d'ordonnancement est divisé en périodes de longueur égale de $\tau = 0.5$ heure. Pour chaque segment de l'horizon glissant k, une phase initiale, H_0, couvrant les périodes 1 à 59, est considérée pour l'initialisation des lots dans les pipelines et les décisions prises précédemment dans les laveries. De la période $TS = 60$ à $TPF_3 = 131$, l'horizon d'ordonnancement H_1 de $D = 36$ heures est considéré. De plus, un horizon H_2, commençant à $TPF_3 + 1$ et s'étendant à $TM = TPF_3 + TT_3$, est établi pour garantir le déchargement complet des lots encore présents dans le pipeline principal à la fin de H_1. À la fin de l'itération k, la solution globale est mise à jour, en conservant la solution obtenue pour $R = 24$ heures et en négligeant les 12 heures supplémentaires. Le processus itératif continue jusqu'à atteindre $k = KM$, et une fois la solution pour $k = KM$ obtenue, elle est ajoutée dans son intégralité à la solution globale.

Les scénarios ont été formulés sur la base de plusieurs critères, tels que le nombre de produits $PM = 3$, les stocks initiaux des bacs, les lots initiaux dans les pipelines, les demandes des clients sur l'horizon d'ordonnancement et les fenêtres de temps de maintenance. En général, au maximum deux produits sont considérés pour des scénarios réels et les dates d'échéance des demandes de produits d'export sont hebdomadaires. Pour tester les limites de l'approche de solution développée, trois produits sont considérés, la demande de produits d'export est augmentée et leurs dates

d'échéance sont quotidiennes. L'eau est considérée comme un produit séparateur, non inclus dans le compte de PM, et se voit attribuer l'indice $PM + 2$, tandis que les arrêts sont indexés comme $PM + 1$. De plus, le débit de filtration est uniformément fixé à $FFU = 1000\ \mathrm{m^3/h}$, et l'opération de transfert a un débit de $1000\ \mathrm{m^3/h}$.

Tableau 5.1. Paramètres des pipelines

	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$
F_n (m^3)	3375	2840	107325
PF_n (m^3/h)	1350	1420	4050
TT_n	6	4	53
TPF_n	125	127	131
TPL_n	131	131	184

Les capacités des pipelines, leurs débits, le nombre de segments désignés par TT_n, la période finale d'ordonnancement pour les opérations d'injection TPL_n et la dernière période d'ordonnancement pour les opérations de déchargement TPL_n sont détaillés dans le Tableau 5.1. Pour les pipelines n_2 et n_3, les arrêts en dehors des fenêtres de temps de maintenance préventive prédéfinies sont interdits, définissant le paramètre $ST_n = 1$ pour ces pipelines. Par conséquent, le nombre maximal de périodes d'arrêt MSD_n pour les pipelines n_2 et n_3 est la somme des intervalles de temps de maintenance programmée à partir de TS jusqu'à la période TPL_n ($MSD_n = \sum_{t=TS}^{TPL_n} PIN_{WS+n,PM+1,t}$). De plus, le pipeline n_1 permet jusqu'à 15 intervalles d'arrêt supplémentaires en dehors des périodes de maintenance ($ST_1 = 0$), un choix fait sur la base des données historiques pour l'horizon d'ordonnancement considéré de 36 heures. Le nombre total d'intervalles d'arrêt pour le pipeline n_1 dans un segment d'ordonnancement k est donc $MSD_1 = \sum_{t=TS}^{TPL_1} PIN_{WS+1,PM+1,t} + 15$.

Le Tableau 5.2 présente les débits de production des produits dans les laveries. De plus, les dernières périodes d'ordonnancement pour les opérations au sein de ces laveries sont les suivantes : $TWL_1 = 125$, $TWL_2 = 127$, $TWL_3 = 131$ et $TWL_4 = 131$.

Tableau 5.2. Débits de production des laveries (m³)

	$p=1$	$p=2$	$p=3$
w_1	1100	1100	1100
w_2	1550	1550	1550
w_3	1100	1100	1100
w_4	500	500	500

En réalité, en raison de contraintes techniques, les niveaux de stock dans les bacs sont maintenus entre des limites minimales et maximales fixées à 10% et 90 % de la capacité totale du bac. Afin de simplifier sans compromettre la généralité du modèle, le Tableau 5.3 ne prend en compte que les capacités de stockage effectives. Similairement aux pipelines et aux laveries, une période TML_m est considérée pour les derniers calculs des niveaux de stocks des bacs à la station m, avec $TML_1 = 125$, $TML_2 = 127$, $TML_3 = 131$ et TML_4 et TML_5 égales à 184. De plus, pour qu'un bac subisse un changement de produit, il doit être vide. Cependant, étant donné la nature discrète du modèle, un changement de produit dans le bac $S_{m,s}$ est autorisé si son niveau de stock tombe en dessous du volume seuil minimum pour le changement de produit $VMTQ_{m,s}$. Pour les bacs multiproduits $S_{1,1}$, $S_{3,2}$ et $S_{4,3}$, les valeurs sont fixées à $VMTQ_{1,1} = 337.5$, $VMTQ_{3,2} = 506$ et $VMTQ_{4,3} = 499$.

Tableau 5.3. Niveaux de stock maximum et minimum autorisés dans les bacs (m³)

$VMTA_{m,s}$	$s=1$	$s=2$	$s=3$
$m=1$	5000	-	-
$m=2$	9000	-	-
$m=3$	9000	9000	-
$m=4$	9000	12000	12000
m = 5	100000	100000	100000

$VMTO_{m,s}$	$s=1$	$s=2$	$s=3$
$m=1$	0	-	-
$m=2$	0	-	-
$m=3$	0	0	-
$m=4$	0	0	0
$m=5$	0	0	0

De plus, le tableau 5.4 décrit les décisions d'ordonnancement autorisées pour les laveries et les pipelines pour les produits $a \in P$, les arrêts $a = PM + 1$ et l'eau $a = PM + 2$. Le tableau 5.5 présente la durée minimale requise pour l'ordonnancement continu des décisions, exprimée en nombre de périodes, et le tableau 5.6 présente les

produits autorisés à être stockés dans les bacs. De plus, les poids utilisés dans la fonction objectif sont fixés à $WC_1 = 10$, $WC_2 = WC_3 = 1$ et $WC_5 = 0.1$, la grande constante $M = 100000$ et la petite constante $\sigma = 0.1$.

Tableau 5.4. Décisions autorisées dans les pipelines et les laveries

	$a = 1$	$a = 2$	$a = 3$	$a = 4$	$a = 5$
w_1	1	1	1	1	-
w_2	1	0	0	1	-
w_3	1	1	0	1	-
w_3	1	0	0	1	-
n_1	1	1	1	1	1
n_2	1	0	0	1	1
n_3	1	1	1	1	1

Tableau 5.5. Durées minimales des décisions d'ordonnancement dans les laveries et les pipelines en nombre de périodes

$PB_{u,a}$	$a = 1$	$a = 2$	$a = 3$	$a = 4$	$a = 5$
w_1	10	8	8	2	-
w_2	8	6	6	2	-
w_3	10	8	8	2	-
w_4	16	16	16	2	-
n_1	8	6	6	6	1
n_2	8	6	6	6	1
n_3	6	2	2	1	1

Tableau 5.6. Produits autorisés dans les bacs

		$p = 1$	$p = 1$	$p = 3$
$m = 1$	$s = 1$	1	1	1
$m = 2$	$s = 1$	1	0	0
$m = 3$	$s = 1$	1	0	0
	$s = 2$	0	1	1
$m = 4$	$s = 1$	1	0	0
	$s = 2$	1	0	0
	$s = 3$	0	1	1
$m = 5$	$s = 1$	1	0	0

	$s = 2$	0	1	0
	$s = 3$	0	0	1

Les données structurelles décrites ci-dessus définissent le problème étudié et sont partagées entre toutes les instances. Les données fournies ci-dessous sont spécifiques à la configuration du problème et uniques pour chaque instance. Le tableau 5.7 détaille les débits journaliers de demande pour le produit P_1 pour toutes les instances. De plus, pour les produits P_2 et P_3, le volume de demande journalière est fixé à 5000 m³ pour les instances 1 à 4, et à 6000 m³ pour les instances 5 à 10. L'état initial des bacs est présenté dans le tableau 5.8, contenant des informations sur les niveaux de stock initiaux au début de l'horizon d'ordonnancement et les produits initiaux dans chaque bac, illustrés par un code couleur. Le tableau 5.9 présente les lots initiaux dans le pipeline principal n_3 au début de l'horizon d'ordonnancement ; les lots sont numérotés du plus éloigné au plus proche de l'origine du pipeline. Au début de l'horizon d'ordonnancement, les pipelines n_1 et n_2 sont remplis de produit P_1 dans toutes les instances. Enfin, le tableau 5.10 présente les heures de début et les durées des maintenances préventives en heures.

Tableau 5.7. Débit de demande journalier pour le produit P_1 en m³/h

Instance	Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4	Jour 5	Jour 6	Jour 7	Jour 8	Jour 9
1	3550	3476	3537	3484	3456	3426	3380	3298	3377
2	3265	3310	3360	3386	3445	3490	3472	3550	3466
3	3320	3299	3284	3355	3446	3479	3476	3427	3454
4	3230	3185	3275	3312	3254	3315	3253	3293	3289
5	3000	3070	3138	3209	3128	3220	3280	3345	3345
6	2850	3010	2926	2918	2966	3035	3089	3170	3208
7	2690	2770	2744	2808	2887	2835	2934	3083	3210
8	3160	3200	3126	3129	3172	3256	3269	3244	3239
9	2960	3070	3116	3114	3210	3190	3239	3225	3261
10	2930	3020	3002	3042	3135	3217	3173	3198	3289

Tableau 5.8. Produits initiaux dans les bacs et niveau de stock en m³

Instance	$S_{1,1}$	$S_{2,1}$	$S_{3,1}$	$S_{3,2}$	$S_{4,1}$	$S_{4,2}$	$S_{4,3}$	$S_{5,2}$	$S_{5,2}$
1	1980	6240	4680	3840	4020	7740	6650	4900	5700
2	1560	7740	4680	1560	1680	4620	3825	6100	5600
3	2940	3240	5160	1860	6360	2680	520	5900	6000
4	1208	4290	840	0	4360	9410	1380	5830	6570
5	70	1290	4440	0	7320	7740	2680	6530	6640
6	3330	5930	2880	960	3940	1635	3790	4850	5770
7	4430	5690	7840	3560	6960	3810	3200	6750	4470
8	3270	5680	6840	0	3490	7070	460	4700	5140
9	4940	3090	5520	840	5880	6010	890	6240	6900
10	3460	7820	1560	2200	5980	5850	2650	5910	4520

p_1 p_2 p_3 eau

Tableau 5.9. Lots initiaux dans le pipeline principal n_3

Instance	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$	$i=10$	$i=11$	$i=12$	$i=13$
1	6075	6075	36450	6075	32400	4050	16200						
2	4050	4050	36450	4050	32400	4050	22275						
3	4050	4050	12150	4050	20250	4050	16200	4050	18225	4050	16200		
4	6075	4050	18225	6075	24300	4050	22275	4050	18225				
5	6075	14175	4050	18225	4050	18225	4050	14175	4050	20250			
6	2025	16200	4050	12150	2025	4050	2025	14175	6075	20250	6075	16200	2025
7	6075	8100	18225	4050	14175	8100	14175	10125	14175	8100	2025		
8	6075	8100	22275	2025	4050	2025	16200	8100	16200	2025	4050	2025	14175
9	12150	8100	16200	2025	4050	2025	18225	8100	16200	8100	12150		
10	2025	16200	8100	12150	2025	6075	2025	16200	8100	14175	8100	12150	

Tableau 5.10. Heures de début des maintenances et durées en heures

	Unité	Début	Durée
Instance 1	w_2	42.5	7
	n_1	106	7.5
Instance 2	n_3	134	2
	n_3	138	2
	w_2	174.5	5
Instance 3	n_3	78.5	2
	w_4	116	5
	n_2	140	6
Instance 4	w_1	40	3
	n_2	104.5	6

	Unité	Début	Durée
Instance 5	w_4	44.5	6
	n_3	115.5	1.5
	w_3	115.5	8
Instance 6	n_1	44.5	5
	w_3	80.5	3
	n_2	158	8
Instance 7	n_3	10.5	1
	n_3	115.5	2
	w_1	126.5	10
	w_4	205	6.5

	Unité	Début	Durée
Instance 8	w_1	62	8
	n_3	145	2
Instance 9	n_3	47	1
	n_3	114.5	1.5
	w_4	151.5	7.5
	n_2	160.5	5
Instance 10	n_2	160	7
	n_3	186.5	1.5

3.2. Résultats numériques

Un horizon d'ordonnancement glissant de 7 jours est adopté pour les 10 instances. Pour le premier jour, les paramètres d'initialisation présentés dans la section précédente sont considérés pour chacune des 10 instances. À partir du deuxième jour, l'état initial du problème d'ordonnancement est défini en fonction des résultats obtenus le jour précédent. Chaque itération k de l'horizon d'ordonnancement glissant implique la résolution d'un problème avec un horizon d'ordonnancement de 36 heures H_1 pour les opérations d'injection des pipelines ; une fois la solution obtenue, les premières 24 heures sont retenues tandis que les 12 heures restantes sont négligées. Le Tableau 5.11 présente les valeurs de la fonction objectif et du GAP pour chaque itération de l'horizon d'ordonnancement glissant pour toutes les instances. Pour des raisons pratiques, une limite de temps d'une heure a été fixée pour tous les problèmes. De plus, à la fin de chaque itération k, la solution obtenue est combinée avec les précédentes dans une solution globale d'ordonnancement.

Tableau 5.11. Résultats numériques

	Day 1		Day 2		Day 3		Day 4		Day 5		Day 6		Day 7	
Instance	Obj val	GAP	Obj val	GAP	Obj val	GAP	Obj val	GAP	Obj val	GAP	Obj val	GAP	Obj val	GAP
1	1225.5	35.7%	1080	54.6%	1552.5	0%	3220	18.9%	2612.5	23.3%	1552.5	69.6%	2880	88.5%
2	1350	28.1%	4896.67	84%	6009.2	70.7%	3329.2	15.1%	3750	19.4%	9375	65.6%	11419.2	49.7%
3	1080	47.7%	22259.2	17.6%	8045	0%	4456.7	77.3%	7532	81.8%	9266.7	41.6%	2350	5.8%
4	2025	64.2%	4964.16	89.5%	2594.5	0.6%	1424.5	50.1%	1552.5	74%	1712.5	78.2%	1350	63.6%
5	1755	8.6%	2522.5	81%	1712.5	3.9%	1485	35.4%	1485	57.3%	540	31.3%	1372.5	74.4%
6	2500	8.1%	1890	63.4%	485	39.6%	2497.5	64.7%	1758.5	54.5%	1289.5	0%	1012.5	41.3%
7	3487.5	37.0%	1735	37.2%	1465	14.6%	2227.5	22%	1620	39%	1417.5	52.4%	1215	39.6%
8	2380	22.7%	2385	66.9%	1980	34.4%	1552.5	30.8%	2850	69.5%	7727.5	95.6%	6215	27.8%
9	1755	13.8%	2075	74.1%	1552.5	0%	7282.5	85.9%	4755	36.4%	2227	45.4%	3625	78.7%
10	2897.5	31.9%	1282.5	52.1%	1012.5	47.3%	1350	49.4%	1012.5	0%	1357	30.6%	1215	23.1%

Pour examiner l'impact d'une limite de temps sur la qualité de la solution, les problèmes du jour 4 pour toutes les instances ont été résolus avec une limite de temps de 24 heures. La Figure 5.7 illustre l'évolution des valeurs moyennes de la fonction objectif des dix instances au fil du temps, divisées par les valeurs moyennes de la fonction objectif obtenues après 5 minutes. Ce graphique met en évidence les améliorations relatives des valeurs de la fonction objectif au fil du temps. Les données empiriques précédentes suggèrent que les solutions obtenues après 15 minutes sont de bonne qualité, montrant une amélioration de 17,3 % par rapport à la valeur moyenne de la fonction objectif de base après 5 minutes. À ce stade, les solutions ont rarement des ruptures de produits qui pourraient s'améliorer avec le temps, et la quantité totale d'eau utilisée est très raisonnable. Après 30 minutes, les solutions sont encore améliorées de 5,5 % par rapport aux résultats de 15 minutes. La valeur moyenne de la fonction objectif continue de s'améliorer, diminuant de 3,6 % supplémentaires après une heure. Au-delà d'une heure, les améliorations des valeurs de la fonction objectif deviennent relativement lentes, prenant un temps considérable.

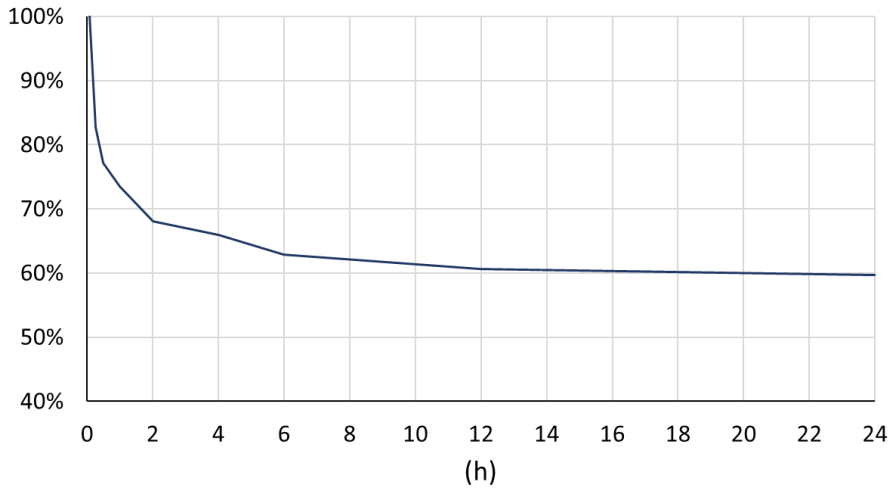


Figure 5.7. Évolution des valeurs moyennes de la fonction objectif par rapport à sa moyenne en 5 minutes pour les problèmes du jour 4

Une fois les solutions obtenues combinées en une solution globale pour toute la durée de l'horizon d'ordonnancement glissant, elles subissent un post-traitement basé sur un modèle MILP pour réduire le nombre de changements d'état dans la laverie w_2, le pipeline de transfert, l'opération de filtration et les alternances entre les bacs stockant P_1 à la station terminale. Une limite de temps de 5 minutes est fixée pour le processus de post-traitement, aboutissant à des solutions avec un gap de moins de 1 % dans la plupart des cas.

Comme présenté dans le Tableau 5.12, le taux de satisfaction moyen pour le produit P_1 est de 99,6 %, pour le produit P_2 est de 95,5 %, et pour le produit P_3 est de 94,5 %. De plus, la quantité totale d'eau utilisée sur l'horizon d'ordonnancement d'une semaine est inférieure à 100 000 m³, ce qui est considéré comme un très bon résultat par rapport aux solutions réalisées manuellement par l'équipe d'ordonnancement de l'entreprise. En outre, l'impact du post-traitement sur la qualité de la solution peut être observé dans la Figure 5.8, représentant les courbes des niveaux de stock pour le cas 1 avant et après le post-traitement. À mesure que le nombre de changements d'état est réduit, les courbes des niveaux de stock deviennent plus lisses, ce qui entraîne une réduction des coûts opérationnels, et les solutions obtenues peuvent être appliquées directement par l'équipe opérationnelle.

Tableau 5.0.12. Résultats des solutions de post-traitement

	Satisfaction rate			Water quantity (m^3)
Instance	P_1	P_2	P_3	
1	99.8%	96.3%	95.8%	71655
2	99.1%	84.2%	80.5%	78475
3	98.3%	96.3%	84.9%	74995
4	100%	97.3%	99%	82420
5	99.9%	98.1%	99.3%	74250
6	100%	97.8%	100%	97270
7	100%	99.5%	97%	89100
8	99.5%	95.5%	91.6%	85725
9	99.2%	89.8%	99.8%	97945
10	100%	100%	97.1%	73645

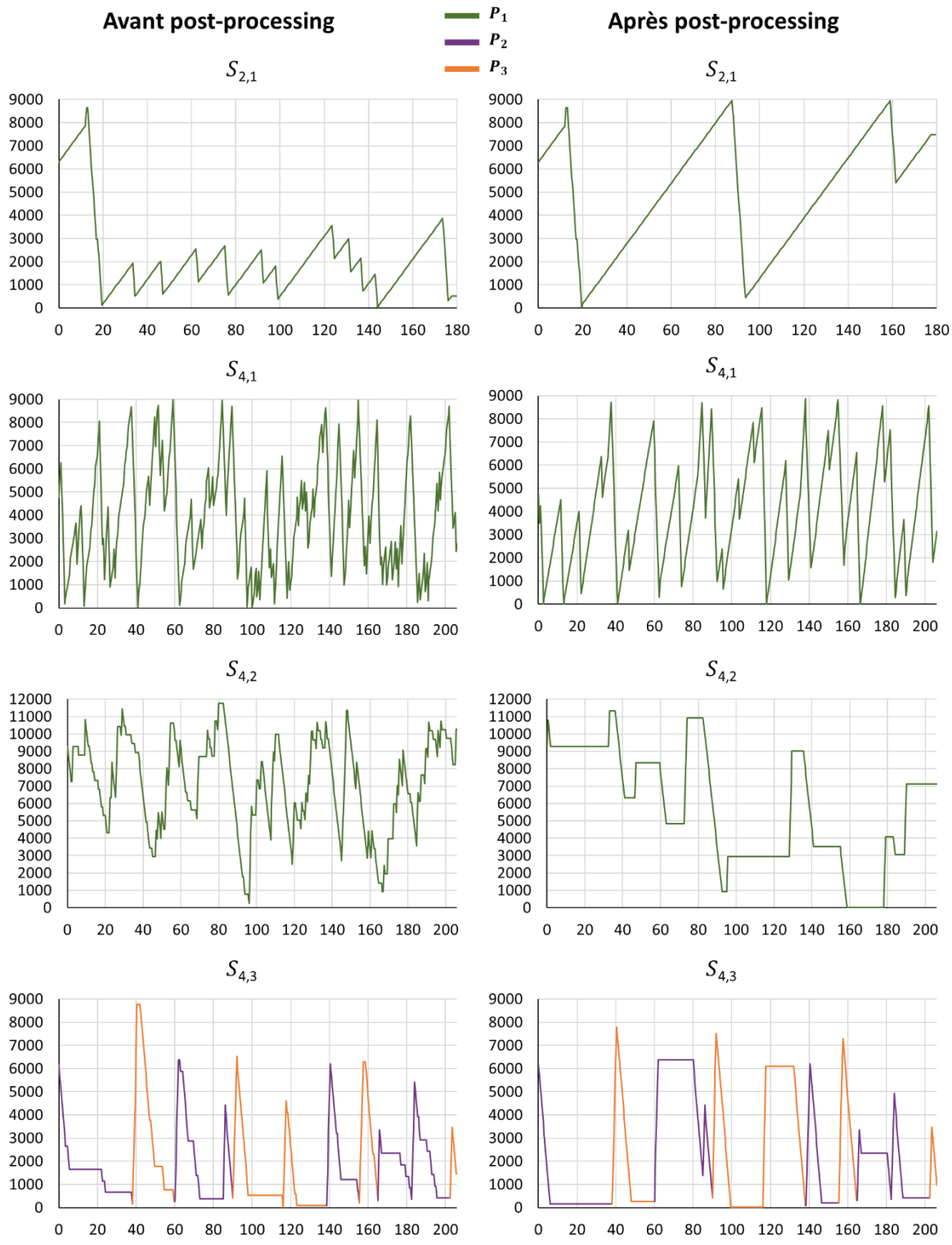


Figure 5.8. Niveaux de stock avant et après le post-traitement

Le diagramme de Gantt dans les Figures 5.9 et 5.10 illustre l'ordonnancement de toutes les unités pour les instances 1 et 5. Il montre le planning d'injection et de

déchargement des pipelines, le planning de production des laveries, le planning des opérations de transfert et des opérations de filtration, ainsi que les valeurs de la variable binaire lpr_t indiquant si P_1 est déchargé dans le bac $S_{4,1}$ (lorsqu'il est égal à 1) ou, alternativement, dans $S_{4,2}$. De plus, les Figures 5.11 et 5.12 illustrent l'évolution des niveaux de stock des bacs au fil du temps pour les instances 1 et 5.

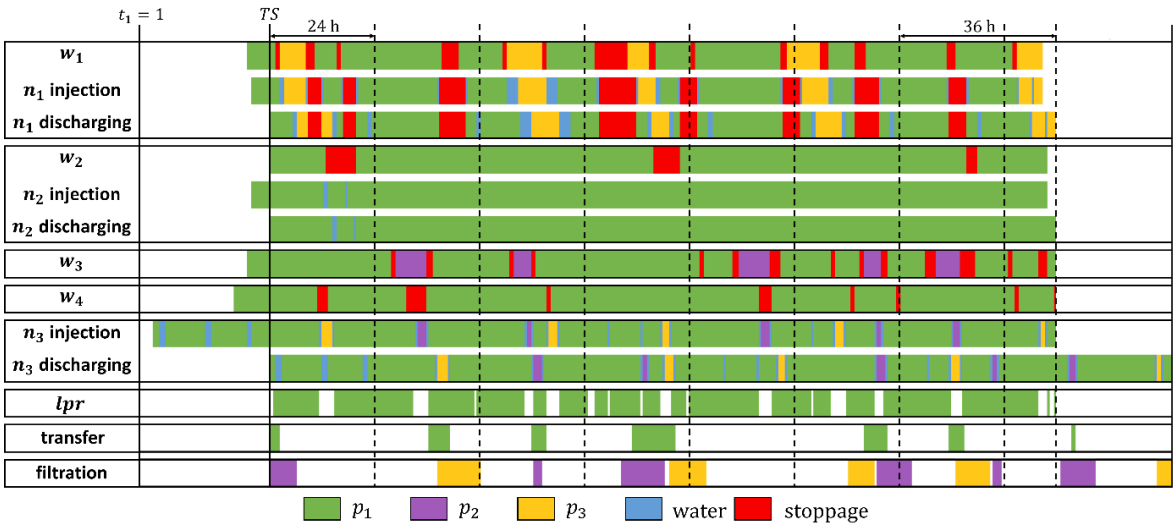


Figure 5.9. Ordonnancement détaillé des opérations pour l'instance 1

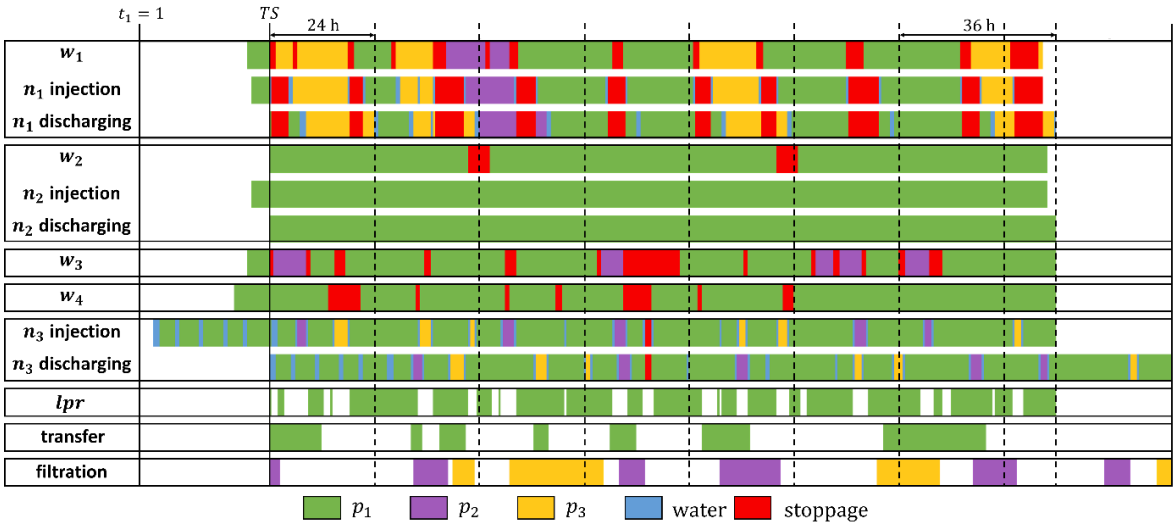


Figure 5.10. Ordonnancement détaillé des opérations pour l'instance 5

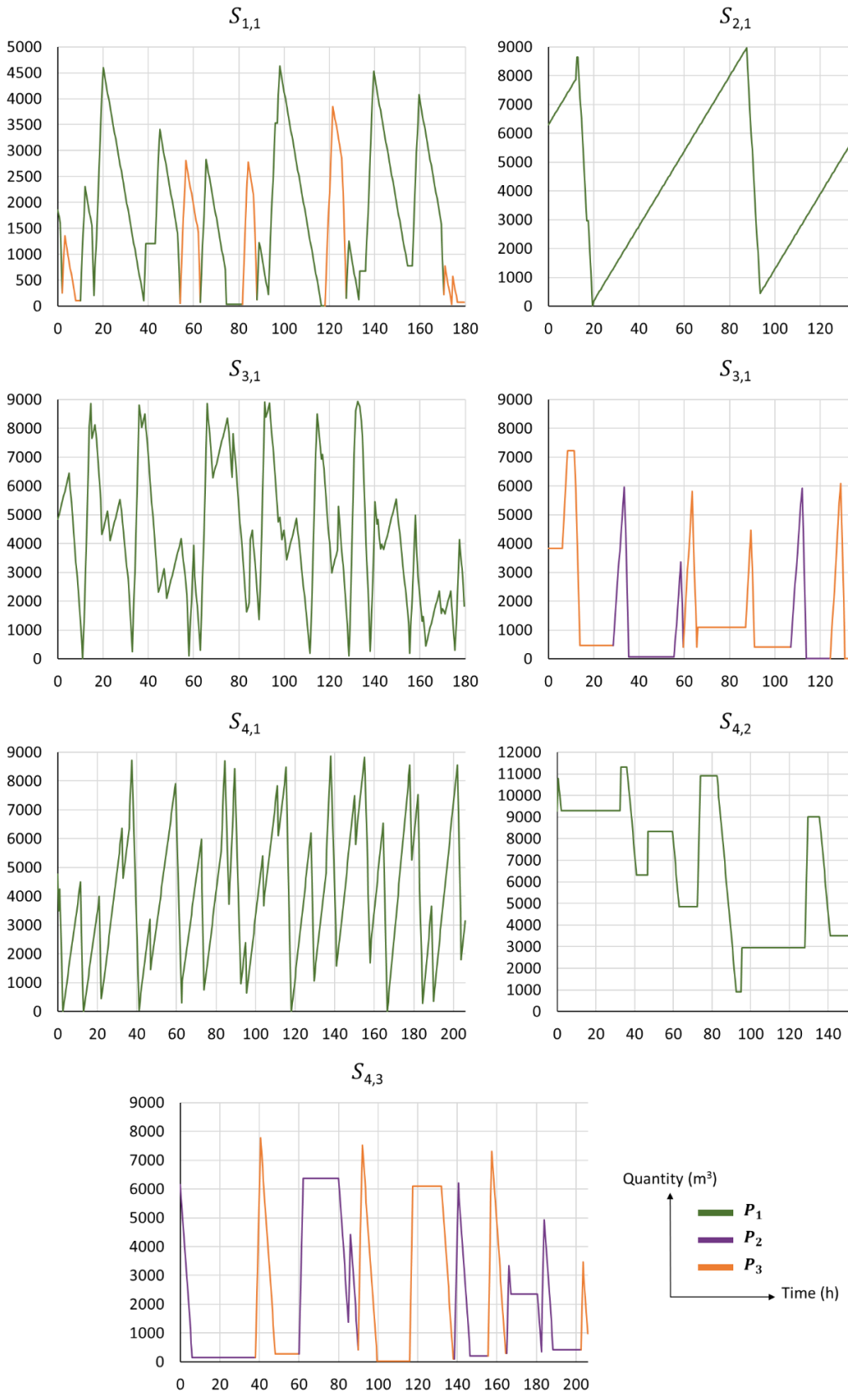


Figure 5.11. Niveaux de stock des bacs pour l'instance 1

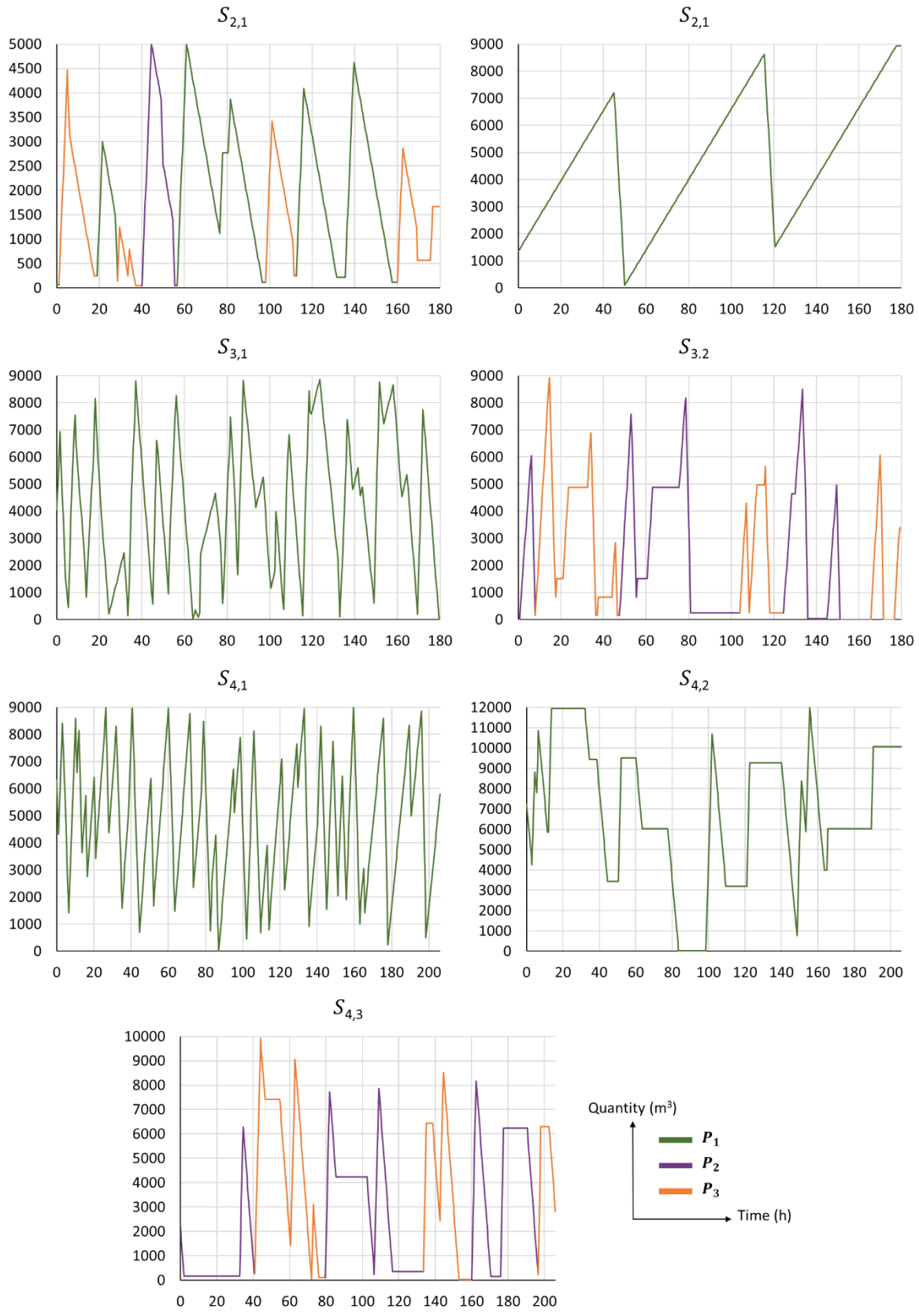


Figure 5.12. Niveaux de stock des bacs pour l'instance 5

4. CONCLUSION

Dans ce travail, une approche dynamique basée sur la programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) avec une décomposition par horizon glissant a été développée pour aborder le problème intégré d'ordonnancement de la production et de la distribution multiproduits par pipelines dans le contexte d'une chaîne de valeur du phosphate. La chaîne de valeur intégrée étudiée s'étend des laveries, où le minerai de phosphate est préparé pour le transport via un réseau de pipelines à longue distance, jusqu'aux clients locaux et internationaux. Le problème d'ordonnancement considéré inclut un problème d'ordonnancement de production multiproduits, incorporant des contraintes liées à la taille des lots et à la durée de configuration en cas de changement de produit. De plus, une solution d'ordonnancement de pipeline multiproduits introduit de nouvelles contraintes pour la gestion de la contamination, la taille des lots et pour déterminer la relation entre les opérations d'injection et de déchargement sans utiliser de système de lots. En outre, un problème de gestion des stocks est considéré, incluant des bacs de capacité limitée et des bacs multiproduits permettant de stocker différents produits à différentes périodes. La gestion complexe des stocks complique davantage le problème d'ordonnancement. Les fenêtres de temps de maintenance sont également prises en compte pour tous les pipelines et les laveries. L'objectif global est de minimiser les ruptures de produits et la quantité totale d'eau injectée dans les pipelines. De plus, une approche de post-traitement basée sur MILP affine davantage la solution globale d'ordonnancement, réduisant le nombre de changements d'état dans plusieurs unités de la chaîne de valeur intégrée et fournissant des solutions d'ordonnancement efficaces pouvant être directement appliquées par l'équipe d'ordonnancement.

Un ensemble de 10 instances a été généré sur la base de la chaîne de valeur intégrée du phosphate sur le site minier de Khouribga du Groupe OCP. Un horizon glissant d'une semaine, divisé en sept périodes, a été considéré pour toutes les instances. L'horizon d'ordonnancement est uniformément discret avec chaque intervalle de temps fixé à 30 minutes. L'approche proposée a pu fournir des solutions de bonne qualité dans un temps CPU raisonnable, en faisant une alternative supérieure aux méthodes d'ordonnancement manuel actuellement adoptées par l'équipe opérationnelle. Les

travaux futurs se concentreront sur l'exploration de l'apprentissage par renforcement comme une approche potentielle pour résoudre les problèmes d'ordonnancement de pipeline multiproduits dans un temps compétitif.

Conclusion

Cette thèse explore un problème d'ordonnancement intégré de la production et de la distribution par pipeline dans l'Axe Nord du Groupe OCP. La chaîne de valeur intégrée s'étend des laveries, utilisées pour la production de minerai de phosphate, aux clients situés à la fin d'un réseau de pipeline multiproduits longue distance. Le problème d'ordonnancement intégré inclut un sous-problème d'ordonnancement de production intégrant des contraintes liées à la taille des lots et aux durées de configuration en cas de changement de produit; un sous-problème d'ordonnancement de réseau de pipeline multiproduits prenant en compte des contraintes sur la taille des lots, le séquencement des lots et le suivi des lots; et un sous-problème de gestion des stocks multiproduits avec une politique de stockage partagé pour plusieurs bacs. De plus, les opérations spécifiques à ce problème, telles que la filtration et le transfert, sont également considérées. L'objectif global est de fournir un ordonnancement détaillé des opérations, respectant toutes les contraintes opérationnelles et satisfaisant la demande des clients. Pour résoudre ce problème d'ordonnancement, cette thèse propose trois approches différentes basées sur la programmation linéaire en nombres entiers mixtes, la simulation à événements discrets et les heuristiques. De plus, une revue approfondie de la littérature sur l'ordonnancement des pipelines multiproduits est fournie.

Dans le chapitre 2, une évaluation approfondie de la littérature sur l'ordonnancement des pipelines multiproduits a été réalisée grâce à une analyse bibliométrique et une revue systématique de la littérature. L'analyse bibliométrique fournit un aperçu de la littérature, illustrant le développement du domaine, catégorisant les publications, identifiant les principaux domaines thématiques, présentant les principaux contributeurs et les sources les plus pertinentes et cartographiant la distribution mondiale de la recherche. En complément de l'analyse bibliométrique, un cadre d'analyse structuré a été développé pour la revue systématique de la littérature,

utilisant divers critères de classification pour explorer l'état actuel de la littérature et les futures directions de recherche potentielles.

Dans le chapitre 3, un modèle MILP a été proposé pour aborder le problème réel d'ordonnancement intégré de la production et de la distribution dans l'Axe Nord du Groupe OCP. L'objectif principal est de fournir un ordonnancement détaillé des opérations qui respecte toutes les contraintes opérationnelles, satisfait la demande des clients et maximise le taux d'utilisation des pipelines. Un ensemble de 10 instances a été généré, basé sur la chaîne de valeur intégrée du phosphate qui est étudiée. Un processus de choix des paramètres, fondé sur des données empiriques a été présenté pour sélectionner le nombre d'intervalles de temps composant l'horizon d'ordonnancement. Le modèle MILP proposé a pu fournir des solutions satisfaisantes en moins d'une heure, offrant une alternative fiable à l'ordonnancement manuel.

Le chapitre 4 a introduit une approche heuristique basée sur la simulation à événements discrets en temps discret pour générer des solutions faisables au problème d'ordonnancement intégré de la production et de la distribution par pipeline. Cette approche proposée a été testée et adoptée avec succès par le Groupe OCP comme outil d'aide à la décision pour effectuer les tâches d'ordonnancement quotidien et pour simuler des scénarios d'ordonnancement difficiles sur des horizons d'ordonnancement à court et à moyen terme. L'heuristique prend en compte toutes les contraintes opérationnelles, y compris le rinçage des bacs et la maintenance, garantissant la satisfaction des demandes des clients avec un minimum de changements de produits dans les laveries. Après huit mois d'exploitation dans des conditions réelles, l'heuristique a donné des résultats satisfaisants.

Dans le chapitre 5, une nouvelle approche dynamique MILP en temps discret, basée sur une approche d'horizon glissant, a été développée pour aborder le problème d'ordonnancement et fournir un moyen d'adapter de manière itérative les solutions d'ordonnancement en fonction des changements de paramètres d'entrée. Étant donné la complexité du problème d'ordonnancement industriel et la multitude de contraintes impliquées, des événements inattendus peuvent se produire fréquemment en une seule journée. L'objectif principal est de réduire les ruptures de produits et la quantité totale

d'eau injectée dans les pipelines. De plus, un processus de post-traitement, basée sur un MILP, a été développée pour affiner la solution globale d'ordonnancement, réduisant ainsi le nombre de changements d'état dans plusieurs unités de la chaîne de valeur intégrée, ce qui se traduit par des solutions d'ordonnancement souhaitables pouvant être directement appliquées par l'équipe d'ordonnancement. L'approche d'ordonnancement dynamique a été testé sur des instances de l'Axe Nord du Groupe OCP, fournissant des solutions de haute qualité dans un temps CPU raisonnable.

Les recherches présentées dans cette thèse apportent des contributions significatives tant aux aspects théoriques que pratiques de l'ordonnancement dans l'industrie du phosphate. Elles élargissent la littérature existante sur l'ordonnancement des laveries, l'ordonnancement des pipelines multiproduits et la gestion des stocks multiproduits, et offrent des outils fiables pour améliorer l'efficacité opérationnelle dans la chaîne de valeur du phosphate. Les modèles et les approches proposés fournissent des solutions robustes aux problèmes complexes d'ordonnancement, assurant une meilleure utilisation des ressources et répondant efficacement aux demandes des clients.

Du point de vue managérial, les travaux présentés dans les chapitres 2 à 5 apportent un ensemble d'outils d'aide à la décision directement applicables dans le contexte opérationnel du Groupe OCP, comme le détaille le tableau 6.1 ci-dessous. Le chapitre 2 offre une cartographie complète de l'état de l'art à travers une étude bibliométrique et une revue systématique de la littérature, permettant aux managers de comprendre l'évolution du domaine et d'identifier des opportunités d'innovation pour orienter les investissements en R&D. Le modèle MILP monolithique du chapitre 3 fournit un outil d'optimisation qui remplace les méthodes manuelles traditionnelles (comme l'utilisation de feuilles de calcul), améliorant la synchronisation entre la production dans les laveries, le transport par pipeline et la gestion des stocks, ce qui se traduit par une meilleure utilisation des ressources et une réduction des coûts opérationnels. Par ailleurs, l'approche heuristique basée sur la simulation à événements discrets développée dans le chapitre 4 offre une solution flexible et réactive, déjà adoptée par l'équipe d'ordonnancement, qui permet de s'adapter rapidement aux imprévus et fluctuations des données d'entrée. Enfin, le modèle MILP à horizon

glissant du chapitre 5, complété par une phase de post-traitement visant à réduire les changements d'état, propose une solution adaptative permettant une re-optimisation itérative en temps réel, minimisant les ruptures de stock et la quantité d'eau injectée dans les pipelines. Dans l'ensemble, ces contributions fournissent aux gestionnaires des outils opérationnels robustes et intégrés pour améliorer la performance globale de la chaîne de valeur.

Tableau 0.1. Apports académiques et managériaux

	Apports académiques	**Apports managériaux**	**Limitations**
Chapitre 2	• Réalisation d'une étude bibliométrique couvrant les publications (2000–2023) sur l'ordonnancement des pipelines multiproduits. • Développement d'un schéma de classification détaillé. • Mise en lumière des domaines sous-explorés et proposition de pistes pour les recherches futures.	• Fournir aux managers une cartographie de l'état de l'art, permettant de mieux comprendre l'évolution du domaine et d'identifier des opportunités d'innovation. • Aide à orienter les investissements en R&D en identifiant les thèmes de recherche porteurs. • Permet d'établir une comparaison entre les méthodes existantes et de justifier le besoin de nouvelles approches opérationnelles.	• L'analyse bibliométrique et la revue systématique restent essentiellement descriptives et n'apportent pas directement une solution opérationnelle.
Chapitre 3	• Développement d'un modèle MILP monolithique en temps continu et centré sur les lots pour l'ordonnancement intégré (production, transport par pipeline et gestion des stocks). • Application du modèle sur des données réelles issues de la chaîne de valeur du Groupe OCP, démontrant la capacité du modèle à générer des solutions optimales ou quasi-optimales en temps raisonnable. • Enrichissement de la littérature par une formulation mathématique adaptée à un problème industriel complexe.	• Offre un outil d'optimisation susceptible de remplacer les méthodes manuelles, améliorant la précision et l'efficacité opérationnelle. • Améliore l'utilisation des pipelines et synchronise la production avec le transport, permettant ainsi une réduction des coûts et une meilleure satisfaction de la demande client. • Intègre de multiples contraintes opérationnelles propres au secteur du phosphate.	• Le modèle monolithique peut devenir lourd en calcul pour des instances de grande taille. • Rigidité dans un environnement dynamique : Moins flexible pour s'adapter en temps réel aux imprévus ou fluctuations opérationnelles importantes.

Chapitre 4	• Conception d'un algorithme heuristique basé sur la simulation à événements discrets pour l'ordonnément détaillé. • Développement d'une approche multi-niveaux intégrant les décisions de production, de transport et de gestion des stocks. • Validation par une étude de cas réelle et démonstration de performances satisfaisantes sur un horizon de deux semaines, avec une application pratique sur 8 mois.	• Fournit une solution flexible et réactive, capable de s'adapter aux imprévus et fluctuations opérationnelles. • Déjà intégré dans les processus décisionnels du Groupe OCP, l'outil permet de réduire la dépendance aux décisions manuelles et d'améliorer la réactivité face aux changements des données d'entrée.	• En tant qu'heuristique, l'optimalité de la solution n'est pas garantie. • La performance peut être sensible au choix des paramètres et nécessite une calibration initiale.
Chapitre 5	• Proposition d'un modèle MILP dynamique en temps discret utilisant un horizon glissant, centré sur les produits plutôt que sur les lots. • Intégration d'une phase de post-traitement MILP pour réduire les changements d'état des laveries et pipelines et lisser les courbes de niveaux de stock. • Prise en compte des aspects dynamiques et de la ré-optimisation itérative, ce qui enrichit la littérature en introduisant une méthode adaptative pour des environnements incertains.	• Offre aux gestionnaires une solution d'ordonnancement adaptative capable de réagir aux changements de données d'entrée en temps réel grâce à un recalcul régulier du planning. • Permet de minimiser les ruptures de stock et de réduire la quantité d'eau injectée, contribuant à une meilleure performance opérationnelle. • Améliore la stabilité et la prévisibilité des opérations par la réduction des changements fréquents de décisions.	• L'intégration en temps réel des données opérationnelles peut constituer un défi pratique important.

D'un point de vue académique, cette thèse contribue au domaine de la gestion de la Supply Chain et de la recherche opérationnelle en proposant des approches de modélisation et de solution innovantes. L'analyse bibliométrique et la revue systématique de la littérature du chapitre 2 offrent une compréhension approfondie de l'état actuel et des futures directions de recherche dans le domaine de l'ordonnancement des pipelines multiproduits. Les modèles MILP proposés et les approches heuristiques des chapitres 3, 4 et 5 offrent de nouvelles perspectives et méthodologies pouvant être appliquées à d'autres industries.

Les travaux futurs se concentreront sur le développement de techniques métaheuristiques et sur l'exploration du potentiel de l'apprentissage par renforcement pour résoudre les problèmes d'ordonnancement des pipelines multiproduits, ainsi que les problèmes d'ordonnancement intégré de la production et de la distribution par pipeline. De plus, les recherches futures pourront intégrer des incertitudes dans les méthodes de résolution, garantissant ainsi la robustesse des solutions face à un environnement incertain.

Bibliographie

Abdellaoui, W., Souier, M., Sahnoun, M., & Ben Abdelaziz, F. (2021). Multi-period optimal schedule of a multi-product pipeline: A case study in Algeria. Computers and Industrial Engineering, 159. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107483

Asl, N. B., & MirHassani, S. A. (2019). Benders decomposition with integer sub-problem applied to pipeline scheduling problem under flow rate uncertainty. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 123, 222–235. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.01.003

Asl, N. B., MirHassani, S. A., Relvas, S., & Hooshmand, F. (2022). A novel two-phase decomposition-based algorithm to solve MINLP pipeline scheduling problem. OPERATIONAL RESEARCH, 22(5), 4829–4863. https://doi.org/10.1007/s12351-022-00738-6

Bamoumen, M., Belil, S., Elfirdoussi, S., Ren, L., & Tchernev, N. (2019). A hybrid heuristic for the multi-product straight pipeline scheduling problem. 52(13), 535–540. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.188

Bamoumen, M., Elfirdoussi, S., Ren, L., & Tchernev, N. (2021). A MILP Model for the Scheduling of a Multiproduct Tree-Structure Pipeline Network in Mining Industry. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 632 IFIP, 299–306. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85906-0_34

Bertsimas, D., & Tsitsiklis, J. N. (1997). Introduction to linear optimization (Vol. 6). Athena Scientific Belmont, MA.

Boschetto, S. N., Magatao, L., Brondani, W. M., Neves, F., Arruda, L. V. R., Barbosa-Povoa, A. P. F. D., & Relvas, S. (2010). An Operational Scheduling Model to Product Distribution through a Pipeline Network. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 49(12), 5661–5682. https://doi.org/10.1021/ie900685v

Bueno, L., Magatao, L., Arruda, L. V. R., Neves, F., Monteiro, A., & Vaqueiro, J. P. (2020). Assigning and sequencing batches and blends of oil derivatives in a mesh-like pipeline network. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 139, 106894. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106894

Cafaro, V. G., Cafaro, D. C., Méndez, C. A., & Cerdá, J. (2010). Oil-derivatives pipeline logistics using discrete-event simulation. 2101–2113. Scopus. https://doi.org/10.1109/WSC.2010.5678864

Cafaro, V. G., Cafaro, D. C., Mendez, C. A., & Cerda, J. (2011). Detailed Scheduling of Operations in Single-Source Refined Products Pipelines. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 50(10), 6240–6259. https://doi.org/10.1021/ie200007a

Cafaro, V. G., Cafaro, D. C., Mendez, C. A., & Cerda, J. (2012). Detailed Scheduling of Single-Source Pipelines with Simultaneous Deliveries to Multiple Offtake Stations. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 51(17), 6145–6165. https://doi.org/10.1021/ie202520a

Cafaro, V. G., Cafaro, D. C., Mendez, C. A., & Cerda, J. (2015a). MINLP model for the detailed scheduling of refined products pipelines with flow rate dependent pumping costs. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 72, 210–221. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.05.012

Cafaro, V. G., Cafaro, D. C., Méndez, C. A., & Cerdá, J. (2015b). Optimization model for the detailed scheduling of multi-source pipelines. Computers and Industrial Engineering, 88, 395–409. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.07.022

Cafaro, D. C., & Cerdá, J. (2004). Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete MILP formulation. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 28(10), 2053–2068. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2004.03.010

Cafaro, D. C., & Cerda, J. (2008a). Dynamic scheduling of multiproduct pipelines with multiple deliv ery due dates. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 32(4–5), 728–753. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2007.03.002

Cafaro, D. C., & Cerda, J. (2008b). Efficient Tool for the Scheduling of Multiproduct Pipelines and Terminal Operations. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 47(24), 9941–9956. https://doi.org/10.1021/ie071630d

Cafaro, D. C., & Cerda, J. (2009). Optimal Scheduling of Refined Products Pipelines with Multiple Sources. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 48(14), 6675–6689. https://doi.org/10.1021/ie900015b

Cafaro, D. C., & Cerda, J. (2010). Operational scheduling of refined products pipeline networks with simultaneous batch injections. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 34(10), 1687–1704. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.03.005

Cafaro, D. C., & Cerdá, J. (2011a). Optimal Scheduling of Multi-Level Tree-Structure Pipeline Networks. In E. N. Pistikopoulos, M. C. Georgiadis, & A. C. Kokossis (Eds.), Computer Aided Chemical Engineering (Vol. 29, pp. 980–984). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53711-9.50196-6

Cafaro, D. C., & Cerda, J. (2011b). A Rigorous Mathematical Formulation for the Scheduling of Tree-Structure Pipeline Networks. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 50(9), 5064–5085. https://doi.org/10.1021/ie101462k

Cafaro, D. C., & Cerdá, J. (2012). Rigorous scheduling of mesh-structure refined petroleum pipeline networks. Computers and Chemical Engineering, 38, 185–203. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.11.007

Cafaro, D. C., & Cerda, J. (2014). Rigorous formulation for the scheduling of reversible-flow multiproduct pipelines. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 61, 59–76. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.10.006

Castro, P. M. (2010). Optimal Scheduling of Pipeline Systems with a Resource-Task Network Continuous-Time Formulation. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 49(22), 11491–11505. https://doi.org/10.1021/ie1010993

Castro, P. M. (2017). Optimal Scheduling of Multiproduct Pipelines in Networks with Reversible Flow. Industrial and Engineering Chemistry Research, 56(34), 9638–9656. Scopus. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b01685

Castro, P. M., & Mostafaei, H. (2017). Product-centric continuous-time formulation for pipeline scheduling. Computers and Chemical Engineering, 104, 283–295. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.04.023

Castro, P. M., & Mostafaei, H. (2019). Batch-centric scheduling formulation for treelike pipeline systems with forbidden product sequences. Computers & Chemical Engineering, 122, 2–18. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.04.027

Chen, H., Wu, C., Zuo, L., Diao, F., Wang, L., Wang, D., & Song, B. (2017a). Optimization of Detailed Schedule for a Multiproduct Pipeline Using a Simulated Annealing Algorithm and Heuristic Rules. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 56(17), 5092–5106. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b04745

Chen, H., Zuo, L., Wu, C., Wang, L., Diao, F., Chen, J., & Huang, Y. (2017b). Optimizing detailed schedules of a multiproduct pipeline by a monolithic MILP formulation. JOURNAL OF PETROLEUM SCIENCE AND ENGINEERING, 159, 148–163. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.09.036

Chen, H., Zuo, L., Wu, C., & Li, Q. (2019). An MILP formulation for optimizing detailed schedules of a multiproduct pipeline network. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 123, 142–164. https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.01.012

Chopra, S., & Meindl, P. (2007). Supply Chain Management. Strategy, Planning & Operation. In C. Boersch & R. Elschen (Eds.), Das Summa Summarum des Management (pp. 265–275). Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9320-5_22

Christopher, M., & Holweg, M. (2011). "Supply Chain 2.0": Managing supply chains in the era of turbulence. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 41(1), 63–82.

Cooper, J., Lombardi, R., Boardman, D., & Carliell-Marquet, C. (2011). The future distribution and production of global phosphate rock reserves. Resources, conservation and recycling, 57, 78-86.

Csontos, B., Halasz, L., & Heckl, I. (2022a). Event-driven simulation method for fuel transport in a mesh-like pipeline network. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 157, 107611. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107611

Csontos, B., Halasz, L., & Heckl, I. (2022b). Improved event-driven simulation method for fuel transport in a mesh-like pipeline network. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 168, 108066. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.108066

De Souza Filho, E. M., Bahiense, L., & Ferreira Filho, V. J. M. (2013). Scheduling a multi-product pipeline network. Computers and Chemical Engineering, 53, 55–69. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.01.019

Dimas, D., Murata, V. V., Neiro, S. M. S., Relvas, S., & Barbosa-Povoa, A. P. (2018). Multiproduct pipeline scheduling integrating for inbound and outbound inventory management. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 115, 377–396. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.04.025

Felizari, L. C., de Arruda, L. V. R., Lüders, R., & Stebel, S. L. (2009). Sequencing Batches in a Real-World Pipeline Network Using Constraint Programming. In R. M. de Brito Alves, C. A. O. do Nascimento, & E. C. Biscaia (Eds.), Computer Aided Chemical Engineering (Vol. 27, pp. 303–308). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70271-8

Féniès, P. (2006). Une méthodologie de modélisation par processus multiples et incrémentiels: Application pour l'évaluation des performances de la Supply Chain [PhD Thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II]. https://theses.hal.science/tel-00717428/

Fishman, G. S. (2001). Discrete-Event Simulation. Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3552-9

Foulds, L. R. (1983). The Heuristic Problem-Solving Approach. The Journal of the Operational Research Society, 34(10), 927–934. https://doi.org/10.2307/2580891

Ghaffari-Hadigheh, A., & Mostafaei, H. (2015). On the scheduling of real world multiproduct pipelines with simultaneous delivery. OPTIMIZATION AND ENGINEERING, 16(3), 571–604. https://doi.org/10.1007/s11081-014-9263-9

Gleizes, M. F., Herrero, G., Cafaro, D. C., Méndez, C. A., & Cerdá, J. (2012). Managing distribution in refined products pipelines using discrete-event simulation. International Journal of Information Systems and Supply Chain Management, 5(1), 58–79. Scopus. https://doi.org/10.4018/jisscm.2012010104

Haoran, Z., Yongtu, L., Qi, L., Yun, S., & Xiaohan, Y. (2018). A self-learning approach for optimal detailed scheduling of multi-product pipeline. Journal of Computational and Applied Mathematics, 327, 41–63. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.cam.2017.05.040

Herran, A., de la Cruz, J.-M., & de Andres, B. (2010). A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 34(3), 401–413. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.11.014

Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2011). Factory physics. Waveland Press.

Huang, L., Liao, Q., Tu, R., Liang, Y., & Zhang, H. (2022). Scheduling based method for estimating remaining capacity of oil product pipeline under the fair opening. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 160, 107726. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107726

Hugos, M. H. (2024). Essentials of supply chain management. John Wiley & Sons. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=zpz0EAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP7&dq=Essentials+of+Supply+Chain+Management.+&ots=jAtGzwJa8j&sig=y1XZ7nlk0zhdbl97WiQvp-zEOUo

Jittamai, P. (2004). Analysis of oil-pipeline* distribution of multiple products subject to delivery time-windows. Texas A&M University. https://search.proquest.com/openview/c490c4b293bad1b01e78f26b987831f7/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y

Karmarkar, N. (1984). A new polynomial-time algorithm for linear programming. Proceedings of the Sixteenth Annual ACM Symposium on Theory of Computing, 302–311. https://doi.org/10.1145/800057.808695

Li, Z., Liang, Y., Liao, Q., Zhang, B., & Zhang, H. (2021a). A review of multiproduct pipeline scheduling: From bibliometric analysis to research framework and future research directions. JOURNAL OF PIPELINE SCIENCE AND ENGINEERING, 1(4), 395–406. https://doi.org/10.1016/j.jpse.2021.08.001

Li, Z., Liang, Y., Liao, Q., Xu, N., Zheng, J., & Zhang, H. (2021b). Scheduling of a branched multiproduct pipeline system with robust inventory management. COMPUTERS & INDUSTRIAL ENGINEERING, 162, 107760. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107760

Liang, Y., Li, M., & Zhang, N. (2012). A study on optimizing delivering scheduling for a multiproduct pipeline. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 44, 127–140. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.05.007

Liao, Q., Zhang, H., Xu, N., Liang, Y., & Wang, J. (2018a). A MILP model based on flowrate database for detailed scheduling of a multi-product pipeline with multiple

pump stations. Computers and Chemical Engineering, 117, 63–81. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.05.002

Liao, Q., Liang, Y., Xu, N., Zhang, H., Wang, J., & Zhou, X. (2018b). An MILP approach for detailed scheduling of multi-product pipeline in pressure control mode. Chemical Engineering Research and Design, 136, 620–637. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.06.016

Liao, Q., Zhang, H., Wang, Y., Zhang, W., & Liang, Y. (2018c). Heuristic method for detailed scheduling of branched multiproduct pipeline networks. Chemical Engineering Research and Design, 140, 82–101. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.10.003

Liao, Q., Zhang, H., Xia, T., Chen, Q., Li, Z., & Liang, Y. (2019a). A data-driven method for pipeline scheduling optimization. Chemical Engineering Research and Design, 144, 79–94. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.01.017

Liao, Q., Castro, P. M., Liang, Y., & Zhang, H. (2019b). Batch-centric model for scheduling straight multisource pipelines. AICHE JOURNAL, 65(10), e16712. https://doi.org/10.1002/aic.16712

Liao, Q., Castro, P. M., Liang, Y., & Zhang, H. (2019c). Computationally Efficient MILP Model for Scheduling a Branched Multiproduct Pipeline System. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 58(13), 5236–5251. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b06490

Liao, Q., Castro, P. M., Liang, Y., & Zhang, H. (2019d). New batch-centric model for detailed scheduling and inventory management of mesh pipeline networks. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 130, 106568. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106568

Magatao, L., Arruda, L. V. R., & Neves-, F. (2011). A combined CLP-MILP approach for scheduling commodities in a pipeline. JOURNAL OF SCHEDULING, 14(1), 57–87. https://doi.org/10.1007/s10951-010-0186-9

Magatão, S. N. B., Magatão, L., Luis Polli, H., Neves, F., De Arruda, L. V. R., Relvas, S., & Barbosa-Póvoa, A. P. F. D. (2012). Planning and sequencing product distribution in a real-world pipeline network: An MILP decomposition approach. Industrial and Engineering Chemistry Research, 51(12), 4591–4609. Scopus. https://doi.org/10.1021/ie2010252

Magatão, S. N. B., Magatão, L., Neves, F., Jr., & Arruda, L. V. R. (2015). Novel MILP Decomposition Approach for Scheduling Product Distribution through a Pipeline Network. Industrial and Engineering Chemistry Research, 54(18), 5077–5095. Scopus. https://doi.org/10.1021/ie5046796

Meira, W. H. T., Magatao, L., Neves, F., Arruda, L. V. R., Vaqueiro, J. P., Relvas, S., & Barbosa-Povoa, A. P. (2021). A solution framework for the long-term scheduling and inventory management of straight pipeline systems with multiple-sources. COMPUTERS & OPERATIONS RESEARCH, 127, 105143. https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105143

Meira, W. H. T., Magatão, L., Relvas, S., Barbosa-Póvoa, A. P., Neves, F., Jr., & Arruda, L. V. R. (2018). A matheuristic decomposition approach for the scheduling of a single-source and multiple destinations pipeline system. European Journal of Operational Research, 268(2), 665–687. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.032

Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). DEFINING SUPPLY CHAIN MANAGEMENT. Journal of Business Logistics, 22(2), 1–25. https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x

MirHassani, S. A., Abbasi, M., & Moradi, S. (2013). Operational scheduling of refined product pipeline with dual purpose depots. APPLIED MATHEMATICAL MODELLING, 37(8), 5723–5742. https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.11.009

MirHassani, S. A., & BeheshtiAsl, N. (2013). A heuristic batch sequencing for multiproduct pipelines. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 56, 58–67. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.05.007

MirHassani, S. A., & Jahromi, H. F. (2011). Scheduling multi-product tree-structure pipelines. Computers & Chemical Engineering, 35(1), 165–176.

MirHassani, S. A., Moradi, S., & Taghinezhad, N. (2011). Algorithm for Long-Term Scheduling of Multiproduct Pipelines. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 50(24), 13899–13910. https://doi.org/10.1021/ie200101a

Moon, Y. B. (2007). Enterprise Resource Planning (ERP): A review of the literature. International Journal of Management and Enterprise Development, 4(3), 235. https://doi.org/10.1504/IJMED.2007.012679

Moradi, S., & MirHassani, S. A. (2016). Robust scheduling for multi-product pipelines under demand uncertainty. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87(9–12), 2541–2549. Scopus. https://doi.org/10.1007/s00170-016-8561-0

Moradi, S., MirHassani, S. A., & Hooshmand, F. (2019). Efficient decomposition-based algorithm to solve long-term pipeline scheduling problem. PETROLEUM SCIENCE, 16(5), 1159–1175. https://doi.org/10.1007/s12182-019-00359-3

Mori, F. M., Lüders, R., de Arruda, L. V. R., Yamamoto, L., Bonacin, M. V., Polli, H. L., Aires, M. C., & de Jesus Bernardo, L. F. (2007). Simulating the operational scheduling of a realworld pipeline network. In Computer Aided Chemical Engineering (Vol. 24, pp. 691–696). Elsevier. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570794607801386

Mostafaei, H., Alipouri, Y., & Zadahmad, M. (2015a). A mathematical model for scheduling of real-world tree-structured multi-product pipeline system. Mathematical Methods of Operations Research, 81(1), 53–81. Scopus. https://doi.org/10.1007/s00186-014-0486-5

Mostafaei, H., Alipouri, Y., & Shokri, J. (2015b). A mixed-integer linear programming for scheduling a multi-product pipeline with dual-purpose terminals. Computational and Applied Mathematics, 34(3), 979–1007. Scopus. https://doi.org/10.1007/s40314-014-0162-7

Mostafaei, H., Castro, P. M., & Ghaffari-Hadigheh, A. (2015c). A Novel Monolithic MILP Framework for Lot-Sizing and Scheduling of Multiproduct Treelike Pipeline Networks. Industrial and Engineering Chemistry Research, 54(37), 9202–9221. Scopus. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b01440

Mostafaei, H., & Castro, P. M. (2017). Continuous-time scheduling formulation for straight pipelines. AICHE JOURNAL, 63(6), 1923–1936. https://doi.org/10.1002/aic.15563

Mostafaei, H., Castro, P. M., & Ghaffari-Hadigheh, A. (2016). Short-term scheduling of multiple source pipelines with simultaneous injections and deliveries. Computers & Operations Research, 73, 27–42. https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.03.006

Mostafaei, H., Castro, P. M., Relvas, S., & Harjunkoski, I. (2021a). A holistic MILP model for scheduling and inventory management of a multiproduct oil distribution system. OMEGA-INTERNATIONAL JOURNAL OF MANAGEMENT SCIENCE, 98, 102110. https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102110

Mostafaei, H., Castro, P. M., Oliveira, F., & Harjunkoski, I. (2021b). Efficient formulation for transportation scheduling of single refinery multiproduct pipelines. EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH, 293(2), 731–747. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.12.034

Mostafaei, H., & Hadigheh, A. G. (2014). A General Modeling Framework for the Long-Term Scheduling of Multiproduct Pipelines with Delivery Constraints. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 53(17), 7029–7042.https://doi.org/10.1021/ie4038032

Olhager, J. (2010). The role of the customer order decoupling point in production and supply chain management. Computers in Industry, 61(9), 863–868.

Polli, H. L., Magatao, L., Magatao, S. N. B., Neves, F., & Arruda, L. V. R. (2017). Collaborative Approach Based on Heuristic Algorithm and MILP Model To Assignment and Sequencing of Oil Derivative Batches in Pipeline Networks. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 56(9), 2492–2514. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b03516

Pritsker, A. A. B., O'Reilly, J. J., & LaVal, D. K. (1997). Simulation with Visual SLAM and AweSim. Wiley.

Qiu, R., Zhang, H., Gao, X., Zhou, X., Guo, Z., Liao, Q., & Liang, Y. (2019). A multi-scenario and multi-objective scheduling optimization model for liquefied light hydrocarbon pipeline system. CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH & DESIGN, 141, 566–579. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.11.018

Quinteros, M., Guignard, M., Weintraub, A., Llambias, M., & Tapia, C. (2019). Optimizing the pipeline planning system at the national oil company. EUROPEAN JOURNAL OF OPERATIONAL RESEARCH, 277(2), 727–739. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.03.007

Raj, A., Mukherjee, A. A., de Sousa Jabbour, A. B. L., & Srivastava, S. K. (2022). Supply chain management during and post-COVID-19 pandemic: Mitigation strategies and practical lessons learned. Journal of Business Research, 142, 1125–1139.

Rejowski, R., & Pinto, J. M. (2002). An milp formulation for the scheduling of multiproduct pipeline systems. BRAZILIAN JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING, 19(4), 467–474. https://doi.org/10.1590/S0104-66322002000400016

Rejowski, R., & Pinto, J. M. (2003). Scheduling of a multiproduct pipeline system. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 27(8–9), 1229–1246. https://doi.org/10.1016/S0098-1354(03)00049-8

Rejowski, R., & Pinto, J. M. (2004). Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 28(8), 1511–1528. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.12.001

Rejowski, R., & Pinto, J. M. (2008). A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 32(4–5), 1042–1066. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2007.06.021

Relvas, S., Barbosa-Povoa, A. P. F. D., & Matos, H. A. (2009). Heuristic batch sequencing on a multiproduct oil distribution system. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 33(3), 712–730. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2008.10.012

Relvas, S., Magatao, S. N. B., Barbosa-Povoa, A. P. F. D., & Neves, F. (2013). Integrated scheduling and inventory management of an oil products distribution system.

OMEGA-INTERNATIONAL JOURNAL OF MANAGEMENT SCIENCE, 41(6), 955–968. https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.01.001

Relvas, S., Matos, H. A., Barbosa-Povoa, A. P. F. D., & Fialho, J. (2007). Reactive scheduling framework for a multiproduct pipeline with inventory management. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 46(17), 5659–5672. https://doi.org/10.1021/ie070214q

Relvas, S., Matos, H. A., Barbosa-Povoa, A. P. F. D., Fialho, J., & Pinheiro, A. S. (2006). Pipeline scheduling and inventory management of a multiproduct distribution oil system. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 45(23), 7841–7855. https://doi.org/10.1021/ie060309c

Schmidt, G., & Wilhelm, W. E. (2000). Strategic, tactical and operational decisions in multi-national logistics networks: A review and discussion of modelling issues. International Journal of Production Research, 38(7), 1501–1523. https://doi.org/10.1080/002075400188690

Seuring, S., & Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. Journal of Cleaner Production, 16(15), 1699–1710.

Sidki, M., Tchernev, N., & Elfirdoussi, S. (2022). A MILP approach for detailed pipeline scheduling and storage management problem in the phosphate industry. IFAC-PapersOnLine, 55(10), 2563–2568. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.095

Sidki, M., Tchernev, N., Fenies, P., Ren, L., & Elfirdoussi, S. (2023). A MILP approach for detailed operational scheduling of a supply chain in the phosphate industry. https://collection-numerique.uqtr.ca/id/eprint/2086/

Sidki, M., Tchernev, N., Féniès, P., Ren, L., & Elfirdoussi, S. (2025a). Multiproduct pipeline scheduling: A comprehensive bibliometric analysis and a systematic literature review. Computers & Chemical Engineering, 192, 108911.

Sidki, M., Tchernev, N., Féniès, P., Ren, L., & Elfirdoussi, S. (2025b). Heuristic based decision approach for an integrated slurry pipeline network scheduling in the phosphate industry. Expert Systems with Applications, 269, 126495.

Sidki, M., Tchernev, N., Féniès, P., Ren, L., & Elfirdoussi, S. (2025c). A monolithic batch-centric MILP approach for a real-world integrated production and pipeline distribution scheduling problem. Computers & Industrial Engineering, 203, 111028.

Spearman, M. L., & Zazanis, M. A. (1992). Push and Pull Production Systems: Issues and Comparisons. Operations Research, 40(3), 521–532. https://doi.org/10.1287/opre.40.3.521

Stebel, S. L., Magatao, S. N. B., Arruda, L. V. R., Neves-, F., Povoa, A. P. F. D., & Relvas, S. (2012). Mixed Integer Linear Programming Formulation for Aiding Planning Activities in a Complex Pipeline Network. INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH, 51(35), 11417–11433. https://doi.org/10.1021/ie202590t

Strachotova, D., & Dyntar, J. (2021). Support of scheduling of multiproduct pipeline systems using simulation in witness. International Journal of Simulation Modelling, 20(3), 536–546. Scopus. https://doi.org/10.2507/IJSIMM20-3-570

Taherkhani, M. (2020). An MILP approach for scheduling of tree-like pipelines with dual purpose terminals. OPERATIONAL RESEARCH, 20(4), 2133–2161. https://doi.org/10.1007/s12351-018-0400-7

Taherkhani, M., Seifbarghy, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Fattahi, P. (2020). Mixed-integer linear programming model for tree-like pipeline scheduling problem with

intermediate due dates on demands. OPERATIONAL RESEARCH, 20(1), 399–425. https://doi.org/10.1007/s12351-017-0329-2

Taherkhani, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Seifbarghy, M., & Fattahi, P. (2017). Detailed scheduling of tree-like pipeline networks with multiple refineries. International Journal of Engineering, Transactions B: Applications, 30(12), 1870–1878. Scopus. https://doi.org/10.5829/ije.2017.30.12c.08

Tamura Lopes, T. M., Cire, A. A., de Souza, C. C., & Moura, A. V. (2010). A hybrid model for a multiproduct pipeline planning and scheduling problem. CONSTRAINTS, 15(2), 151–189. https://doi.org/10.1007/s10601-009-9086-z

Tchernev, N. (1997). Modélisation du processus logistique dans les systèmes flexibles de production [PhD Thesis, Clermont-Ferrand 2]. https://www.theses.fr/1997CLF21879

Thiel, D. V. (2014). Research Methods for Engineers (1st ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139542326

Tsunoda Meira, W. H., Magatao, L., Neves-Jr, F., Arruda, L. V. R., Vaqueiro, J. P., Relvas, S., & Barbosa-Povoa, A. P. (2020). Scheduling of a single-source multiproduct pipeline system by a matheuristic approach: Combining simulated annealing and MILP. COMPUTERS & CHEMICAL ENGINEERING, 136, 106784. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106784

Van Dantzig, D. (1947). General procedures of empirical science. Synthese, 5(9), 441–455. https://doi.org/10.1007/BF02267717

Xin, S., Liang, Y., Zhou, X., Li, W., Zhang, J., Song, X., Yu, C., & Zhang, H. (2019). A two-stage strategy for the pump optimal scheduling of refined products pipelines. CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH & DESIGN, 152, 1–19. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.09.014

Xu, N., Liao, Q., Li, Z., Liang, Y., Qiu, R., & Zhang, H. (2021). An efficient decomposition approach for the low-energy scheduling of a straight multiproduct pipeline. CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH & DESIGN, 165, 341–360. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.10.022

Yan, Y., Castro, P. M., Liao, Q., & Liang, Y. (2021). An effective decomposition algorithm for scheduling branched multiproduct pipelines. Computers and Chemical Engineering, 154. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107494

Yu, L., Chen, M., & Xu, Q. (2020). Simultaneous scheduling of multi -product pipeline distribution and depot inventory management for petroleum refineries. CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE, 220, 115618. https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115618

Zaghian, A., & Mostafaei, H. (2016). An MILP model for scheduling the operation of a refined petroleum products distribution system. OPERATIONAL RESEARCH, 16(3), 513–542. https://doi.org/10.1007/s12351-015-0212-y

Zhou, X., Zhang, H., Qiu, R., Liang, Y., Wu, G., Xiang, C., & Yan, X. (2019). A hybrid time MILP model for the pump scheduling of multi-product pipelines based on the rigorous description of the pipeline hydraulic loss changes. Computers and Chemical Engineering, 121, 174–199. Scopus. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.10.001

Proposition d'une approche intégrée des activités de transports et de production dans la supply chain minière

Résumé :

L'industrie minière est un pilier du développement industriel, soutenant des secteurs vitaux tels que la construction, l'industrie manufacturière, la technologie et l'agriculture. En particulier, l'industrie du phosphate est essentielle à l'agriculture et à la production alimentaire, assurant la sécurité alimentaire mondiale pour une population en constante croissance. Son impact économique dépasse l'agriculture, contribuant de manière significative aux économies des pays riches en phosphates tels que le Maroc. Motivée par la chaîne de valeur intégrée de production de phosphate et de distribution par réseau de pipeline de l'axe nord du Groupe OCP, cette thèse de doctorat, menée à l'Université Paris-Panthéon-Assas et à EMINES-School of Industrial Management, étudie des solutions opérationnelles pratiques pour l'ordonnancement de la production des laveries, du transport par pipeline et la gestion des stocks multiproduits. La recherche est motivée par la nécessité de remplacer les méthodes d'ordonnancement manuelles, généralement basées sur des feuilles de calcul, qui peuvent manquer de vision et être sujettes aux erreurs humaines.

Cette thèse s'appuie sur une analyse bibliométrique et une revue systématique de la littérature concernant l'ordonnancement des pipelines multiproduits, en se concentrant sur les travaux publiés de l'an 2000 à 2023. L'analyse bibliométrique utilise trois bases de données bibliographiques scientifiques réputées pour arriver à une compréhension générale de l'évolution de la recherche, des thèmes clés, des auteurs et des revues pertinents, ainsi que de la répartition géographique des affiliations des auteurs. Les articles pertinents ont été examinés à l'aide d'un protocole de recherche structuré, qui classe la littérature en thèmes communs, offrant une compréhension approfondie de l'état actuel du domaine et mettant en évidence des directions prometteuses pour les recherches futures.

La thèse présente trois solutions différentes pour l'ordonnancement intégré de la production des laveries, l'ordonnancement du transport par réseau de pipelines et la gestion des stocks multiproduits. Premièrement, un modèle de programmation linéaire mixte à variables entières (MILP) monolithique, basé sur les lots et à temps continu, a été développé avec l'objectif de créer un plan d'ordonnancement couvrant toutes les opérations détaillées de la chaîne de valeur, en maximisant l'utilisation des pipelines et en respectant les contraintes opérationnelles. Le modèle MILP a été évalué en utilisant des instances de jeux de données réelles provenant de la chaîne de valeur de l'OCP ; les résultats expérimentaux démontrent son efficacité à fournir des solutions optimales et quasi-optimales dans un temps CPU raisonnable.

Deuxièmement, une approche heuristique, basée sur la simulation à événements discrets pour l'ordonnancement détaillé des opérations, a été proposée et évaluée via une étude de cas réelle sous différents scénarios, sur un horizon de deux semaines. Les résultats démontrent que l'approche fournit des solutions d'ordonnancement satisfaisantes dans un temps CPU raisonnable. De plus, cette heuristique donne des résultats satisfaisants après huit mois de fonctionnement dans des conditions réelles.

Troisièmement, une nouvelle approche MILP, basée sur un horizon roulant pour l'ordonnancement dynamique détaillé, a été développée. Les principaux objectifs sont de réduire les ruptures totales de produits et de minimiser la quantité d'eau injectée dans les pipelines. Enfin, une procédure de post-traitement, basée sur un autre modèle MILP a été modélisée pour minimiser les changements d'état dans plusieurs unités, affinant ainsi les

solutions d'ordonnancement et les rendant directement applicables en conditions réelles. La solution a été testée à l'aide de données réelles, provenant de la chaîne de valeur de l'OCP ; les résultats démontrent son efficacité à fournir des solutions de haute qualité dans un temps CPU raisonnable.

Descripteurs : industrie du phosphate, chaîne de valeur intégrée, pipelines multiproduits, production, gestion des stocks, ordonnancement des opérations, analyse bibliométrique, revue systématique de la littérature, modèle MILP, heuristiques, simulation à événements discrets

Integrated approach to production and pipeline transportation in the mining supply chain

Abstract:

The mining industry is a cornerstone of industrial development, supporting vital sectors such as construction, manufacturing, technology, and agriculture. The phosphate industry, in particular, is essential for agriculture and food production, ensuring global food security for the continuously growing global population. Its economic impact extends beyond agriculture, contributing significantly to the economies of phosphate-rich countries, such as Morocco. Motivated by the OCP Group's North Axis integrated phosphate production and pipeline distribution supply chain, this doctoral thesis, conducted at Paris-Panthéon-Assas University and EMINES-School of Industrial Management, seeks practical operational solutions for washing stations production scheduling, pipeline transportation scheduling, and multiproduct inventory management. The research is driven by the need to replace manual scheduling methods, typically reliant on spreadsheets, which can be shortsighted and prone to human error.

This thesis is supported by a bibliometric analysis and systematic literature review on multiproduct pipeline scheduling, focusing on works published between 2000 and 2023. The bibliometric analysis utilizes three reputable bibliographic databases to gain a general understanding of the research evolution, key themes, relevant authors, and journals, as well as the country-wise distribution of authors' affiliations. Relevant articles were systematically reviewed using a developed research framework that classifies this literature into common themes, providing a comprehensive understanding of the field's current state and highlighting promising directions for future research.

The thesis presents three different solutions for integrated washing stations production scheduling, pipeline network transportation scheduling, and multiproduct inventory management. Firstly, a monolithic batch-centric, continuous-time mixed-integer linear programming model has been developed with the objective of creating a scheduling plan for all detailed operations in the supply chain while maximizing the use of pipelines for product transportation and adhering to operational constraints. The proposed MILP model was evaluated using real dataset instances from OCP's supply chain, and the experimental results demonstrate its efficiency in providing optimal and near-optimal solutions within a reasonable CPU time.

Secondly, a discrete event simulation-based heuristic approach for the detailed scheduling of the integrated supply chain's operations has been developed and evaluated using a real-world case study under different scenarios over a horizon of two weeks. The experimental results show that the proposed approach provides desirable scheduling solutions within a reasonable CPU time. Moreover, the proposed heuristic yields satisfactory results after eight months of operation under real-world conditions.

Thirdly, a novel mixed-integer linear programming solution framework based on a rolling horizon approach for the detailed dynamic scheduling of the supply chain's operations has been developed. The primary objectives of this framework are to reduce total product shortages and minimize the quantity of water injected into the pipelines. Additionally, a post-processing MILP-based procedure has been developed to minimize state changes across multiple units, thereby refining scheduling solutions and making them directly applicable in real-world operations. The proposed solution framework was tested using real dataset instances from OCP's supply chain, and the experimental results demonstrate its effectiveness in providing high-quality solutions within a reasonable CPU time.

Keywords: phosphate industry, integrated supply chain, multiproduct pipelines, production, inventory management, operations scheduling, bibliometric analysis, systematic literature review, MILP model, heuristics, discrete event simulation