



HAL
open science

Modélisation et optimisation d'un réseau de pipelines lors de l'approvisionnement et de la distribution des produits miniers

Meryem Bamoumen

► **To cite this version:**

Meryem Bamoumen. Modélisation et optimisation d'un réseau de pipelines lors de l'approvisionnement et de la distribution des produits miniers. Autre [cs.OH]. Université Clermont Auvergne, 2022. Français. NNT : 2022UCFAC062 . tel-04080618

HAL Id: tel-04080618

<https://theses.hal.science/tel-04080618>

Submitted on 25 Apr 2023

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

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

Université Clermont Auvergne

ECOLE DOCTORALE

SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT FERRAND

THESE

Présentée par

Meryem BAMOUMEN

Diplômée de l'Ecole Mohammadia d'Ingénieurs-Rabat MAROC (2015)

Ingénieur en Génie Mécanique

pour obtenir le grade de

Docteur d'Université

Spécialité : INFORMATIQUE

Modélisation et optimisation d'un réseau de pipelines
lors de l'approvisionnement et de la distribution des
produits miniers

Soutenue publiquement le 22 novembre 2022 devant le jury :

| | | |
|----------|--------------------|------------------------|
| Madame | Olga BATAIA | Rapporteur |
| Madame | Marie-Ange MANIER | Rapporteur |
| Monsieur | Jean-Luc PARIS | Examineur |
| Monsieur | Hamid ALLAOUI | Examineur |
| Monsieur | Nicolas CHEIMANOFF | Examineur |
| Madame | Selwa ELFIRDOUSSI | Co-Directrice de thèse |
| Monsieur | Nikolay TCHERNEV | Co-Directeur de thèse |
| Monsieur | Libo REN | Co-Directeur de thèse |

Remerciements

Je voudrais dans un premier temps exprimer ma reconnaissance à mon directeur de thèse, Professeur Nikolay TCHERNEV, pour son implication tout au long de cette thèse, ainsi que pour la confiance qu'il m'a donnée pour réaliser ces travaux de recherche. Sa disponibilité, sa patience et son soutien m'ont encouragé à persévérer pour aller jusqu'au bout de cette thèse. Je voudrais également remercier mes co-encadrants, Madame Selwa EL FIRDOUSSI et Monsieur Libo REN, non seulement pour leur encadrement et leur aide précieuse, notamment dans le domaine de la programmation, mais également pour leur support continu et leur sympathie. Leurs suggestions en rédaction ont permis d'améliorer ce manuscrit.

J'adresse mes remerciements aux membres du jury pour leur relecture minutieuse. Je tiens à remercier particulièrement Madame Olga BATTAIA et Madame Marie-Ange MANIER d'avoir accepté d'être rapporteurs et d'évaluer ma thèse. Je remercie également Monsieur Jean-Luc PARIS, Monsieur Hamid ALLAOUI et Monsieur Nicolas CHEIMANOFF d'avoir accepté de participer au jury de cette thèse.

J'aimerais remercier Monsieur Nabil ATLASSI, directeur de la planification et performance dans le site minier de Khouribga du Groupe OCP, et toute l'équipe de planification du site minier de Khouribga, pour leur implication dans mon sujet. Les discussions et les échanges que nous avons eu tout au long de cette thèse ont contribué à l'amélioration de ma compréhension du terrain, et par conséquent à l'avancée de ces travaux de recherche.

J'exprime ma gratitude au Professeurs Nicolas CHEIMANOFF et Vincent GIARD, de m'avoir accordé l'opportunité d'accomplir mes études universitaires au sein du laboratoire de l'EMINES, à l'Université Mohammed VI Polytechnique. Je remercie également l'Université de Clermont-Auvergne, de m'avoir accueilli au sein de leur personnel afin de mener mes travaux de recherche. Je remercie toute personne du Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS) avec qui j'ai eu la chance de discuter durant mes séjours à Clermont-Ferrand.

Je remercie toute ma famille pour leur support inconditionnel et leur soutien moral durant cette thèse. Enfin, je remercie tous mes amis avec qui j'ai partagé d'agréables moments tout en long de cette aventure.

Résumé

L'industrie minière, et particulièrement l'industrie des phosphates, joue un rôle capital dans la croissance industrielle des sociétés. Néanmoins, l'exploitation du phosphate se trouve actuellement face à de nombreux défis, dans le contexte du développement durable, liés notamment à la forte exploitation de ce minerai, ce qui conduit à l'appauvrissement de ses réserves, à la croissance de la population mondiale et aux restrictions imposées par les normes quant au respect de l'environnement.

Par conséquent, conscient des obstacles de la sécurité alimentaire, le Groupe OCP, considéré comme premier exportateur du phosphate et de ses dérivés, a adopté une stratégie axée sur l'augmentation des capacités de production de ses usines, tout en maîtrisant le coût de revient et en assurant la flexibilité industrielle, afin de faire face aux variations du marché mondial des phosphates. Cette reconfiguration des processus et des méthodes de production, au niveau de l'ensemble de la chaîne logistique du Groupe OCP, a soulevé plusieurs problèmes susceptibles de donner lieu à des projets de recherche digne de considération.

De ce fait, la présente thèse s'inscrit dans le cadre de la chaire d'optimisation industrielle liée à l'EMINES School of Industrial Management de l'Université Mohammed VI Polytechnique, et particulièrement au niveau de la chaîne Axe Nord, qui est l'un des trois axes constituant la chaîne logistique complexe du Groupe OCP. Les travaux effectués ont également eu lieu au sein du Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS), à l'Université de Clermont-Auvergne. La problématique industrielle soulevée cadre autour des problèmes de planification et d'ordonnancement des chaînes logistiques, et concerne particulièrement l'ordonnancement du réseau de pipelines mis en place au niveau de la chaîne Axe Nord du Groupe OCP.

En considérant le problème industriel, une modélisation des processus du système logistique à étudier a d'abord été effectuée, en vue de pouvoir comprendre son fonctionnement. Ensuite, à partir de l'analyse de la littérature sur les problèmes d'ordonnancement des pipelines, la problématique industrielle a été ramenée à deux problèmes d'ordonnancement à la fois, en fonction des demandes auxquelles doit répondre le système considéré : le Problème d'Ordonnancement des Pipelines linéaires Multiproduits de type « one-to-one » (POPM-T1) dans le cas où deux demandes au plus sont à satisfaire, et le Problème d'Ordonnancement de Réseau de Pipelines de type « tree-structure » (PORP-TS) dans le cas de plusieurs demandes.

Ainsi, les travaux de recherche sont orientés sur l'études de ces deux problèmes d'ordonnancement. Il s'agit donc de développer des outils d'aide à la décision et des méthodes de planification et d'ordonnancement des produits, sur le niveau tactique et opérationnel, pour répondre à la demande des clients sur un horizon de planification bien défini, tout en respectant les différentes contraintes.

Un premier travail a consisté à proposer un modèle linéaire pour traiter le Problème d'Ordonnancement des Pipelines linéaires Multiproduits de type « one-to-one » (POPM-T1). Un second travail a porté sur le développement d'une méthode approchée afin d'étudier le Problème d'Ordonnancement des Pipelines linéaires Multiproduits de type « one-to-one » (POPM-T1). Ces méthodes ont été considérées dans le domaine pétrolier, mais peuvent être adaptée au cas de l'OCP, en ajustant quelques paramètres d'entrée. Un dernier travail a concerné la proposition d'un modèle linéaire pour étudier le Problème d'Ordonnancement de Réseau de Pipelines de type « tree-structure » (PORP-TS), lié au cas de l'OCP, dans le contexte de l'industrie minière. Plusieurs expérimentations numériques ont été réalisées, à partir d'instances dont les unes avec un horizon à court terme (quelques jours), et d'autres avec un horizon allant jusqu'à un mois. Les résultats obtenus montrent que les trois méthodes proposées peuvent être utilisés dans le domaine industriel, que ce soit pour la planification à court terme ou pour la planification tactique.

Abstract

The mining industry, and particularly the phosphate industry, plays a key role in the industrial growth of societies. Nevertheless, phosphate mining is currently facing many challenges, in the context of sustainable development, linked in particular to the high exploitation of this mineral, which leads to the exhaustion of its reserves, to the growth of the world population and to the restrictions imposed by the norms regarding the respect of the environment.

Consequently, aware of the challenges of food security, OCP Group, considered as the first exporter of phosphate and its derivatives, adopted a strategy focused on increasing the production capacities of its plants, while controlling the cost price and ensuring industrial flexibility, in order to face the fluctuations of the world phosphate market. This reconfiguration of production processes and methods, in all the supply chain of OCP Group, has raised several problems likely to give rise to some interesting research projects.

Therefore, the present thesis is included within the framework of the chair of “Industrial Optimization” linked to EMINES “School of Industrial Management” of Mohammed VI Polytechnic University, and particularly in the “North Axis” chain, which is one of the three axes which constitutes the complex supply chain of OCP Group. The research work carried out also took place within the Laboratory of Computer Science, Modeling and Optimization of Systems (LIMOS), at the University of Clermont-Auvergne. The industrial problem raised is related to supply chain planning and scheduling problems, and concerns particularly the scheduling of the pipeline network set up in the “North Axis” chain of OCP Group.

Starting from the industrial problem, a modeling of the processes of the system to be studied was first achieved, in order to understand its functioning. Then, based on the analysis of the literature on pipeline scheduling problems, the industrial problem was brought down to two scheduling problems, depending on the demands to be satisfied by the system under consideration: the "one-to-one" linear multi-product pipeline scheduling problem in the case where no more than two demands are to be met, and the "tree-structure" pipeline network scheduling problem in the case of several demands.

Thus, the research work is directed towards the study of these two scheduling problems. It is about developing decision support tools and methods for product planning and scheduling, on the tactical and operational level, to meet customer demand on a fixed planning horizon, while respecting the various constraints.

A first work consisted in proposing a linear model to deal with the "one-to-one" linear multi-product pipeline scheduling problem. A second work focused on the development of a heuristic method to study the "one-to-one" linear multi-product pipeline scheduling problem. These two methods have been considered in the context of petroleum industry, but can be adapted to the case of OCP Group, by adjusting some parameters. A last work concerned the proposal of a linear model to study the "tree-structure" pipeline network scheduling problem, related to OCP Group, in the context of the mining industry. Several numerical experiments have been carried out, based on instances with a short term horizon (a few days), and others with a horizon of up to one month. The results obtained show that the three proposed methods can be applied in the industrial field, either for short-term planning or for tactical planning.

Table des matières

| | |
|--|------|
| Remerciements | I |
| Résumé | III |
| Abstract..... | V |
| Table des matières | VII |
| Liste des figures..... | IX |
| Liste des tableaux | XIII |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre 1 | 7 |
| 1 Présentation de la problématique | 7 |
| 1.1 Introduction..... | 7 |
| 1.2 Contexte industriel | 8 |
| 1.3 Problématique | 17 |
| 1.4 Méthodes de résolution | 30 |
| 1.5 Conclusion | 37 |
| Chapitre 2 | 39 |
| 2 Problème d'Ordonnancement de Pipelines Multiproduits de type « One-to-One » : modélisation et résolution exacte | 39 |
| 2.1 Introduction..... | 39 |
| 2.2 Définition du POPM-T1..... | 40 |
| 2.3 Etat de l'art / Aperçu des études existantes pour le POPM-T1..... | 45 |
| 2.4 Modélisation mathématique proposée dans cette thèse | 55 |
| 2.5 Expérimentations numériques..... | 70 |
| 2.6 Conclusion | 83 |
| Chapitre 3 | 85 |
| 3 Problème d'ordonnancement de Pipelines Multiproduits de type « One-to-One » : résolution approchée..... | 85 |
| 3.1 Introduction..... | 85 |
| 3.2 Présentation du GRASP-like proposé | 86 |
| 3.3 Expérimentations numériques..... | 126 |
| 3.4 Conclusion | 134 |
| Chapitre 4 | 137 |
| 4 Proposition d'un programme linéaire pour le Problème d'Ordonnancement des Réseaux de Pipelines « PORP » : cas OCP | 137 |
| 4.1 Introduction..... | 137 |
| 4.2 Définition du PORP : cas OCP | 138 |

| | | |
|-------------------------------------|--|------------|
| 4.3 | Etat de l’art du « PORP » | 141 |
| 4.4 | Proposition d’un nouveau programme linéaire mixte pour le « PORP-TS » lié au cas OCP | 158 |
| 4.5 | Expérimentations numériques | 180 |
| 4.6 | Conclusion | 216 |
| Conclusion générale | | 219 |
| Synthèse des travaux réalisés | | 219 |
| Contributions de la thèse | | 220 |
| Perspectives de recherche | | 223 |
| Bibliographie | | 225 |
| Annexes | | 231 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1.1 : Chaînes logistiques du Groupe OCP | 10 |
| Figure 1.2 : Schéma de flux de la chaîne Axe Nord OCP..... | 14 |
| Figure 1.3 : Le réseau de pipelines l'OCP | 16 |
| Figure 1.4 : Pipeline linéaire de type « one-to-one » | 20 |
| Figure 1.5 : Exemple d'un pipeline linéaire de type « one-to-many »..... | 21 |
| Figure 1.6 : Exemple d'un pipeline linéaire de type « many-to-many »..... | 22 |
| Figure 1.7 : Exemple d'un réseau de pipelines de type « tree-structure » | 24 |
| Figure 1.8 : Exemple d'un réseau de pipelines de type « mesh-structure »..... | 25 |
| Figure 1.9 : Modélisation du réseau de pipelines OCP dans le cas de deux demandes | 28 |
| Figure 1.10 : Modélisation du réseau de pipelines OCP dans le cas de multi demandes | 29 |
| Figure 2.1 : Schéma du pipeline « One-to-One »..... | 41 |
| Figure 2.2 : Modélisation du POPM-T1 « One-to-One » | 44 |
| Figure 2.3 : Opérations de déchargement des lots | 56 |
| Figure 2.4 : Relation entre le volume journalier déchargé du lot i $v_{ji, t}$ et la variable binaire $fsIA_{i, t}$ | 62 |
| Figure 2.5 : Ordre de déchargement des lots successifs assuré par la variable binaire $fsIA_{i, t}$ 62 | |
| Figure 2.6 : Schéma représentant les conditions qui autorisent un arrêt du pipeline | 65 |
| Figure 2.7 : Modélisation du volume contaminé entre les lots successifs | 66 |
| Figure 2.8 : Exemple de solution représentant un ordonnancement des lots | 68 |
| Figure 2.9 : Exemples de matrices de compatibilités des produits (cas des produits pétroliers et des produits de phosphate) | 69 |
| Figure 2.10 : Exemple de schéma d'ordonnancement du pipeline "One-to-One": instance 2 avec 30 jours et 6 produits..... | 76 |
| Figure 2.11 : Analyse de la convergence du modèle linéaire concernant l'instance 1 avec 30 jours et 6 produits..... | 78 |
| Figure 2.12 : Analyse de la convergence du modèle linéaire concernant l'instance 6 avec 30 jours et 6 produits..... | 78 |
| Figure 2.13 : Analyse de la convergence du modèle linéaire concernant l'instance 7 avec 30 jours et 4 produits..... | 79 |
| Figure 2.14 : Analyse de la convergence du modèle linéaire concernant l'instance 2 avec 30 jours et 4 produits..... | 80 |
| Figure 2.15 : Evolution du temps de résolution en fonction de la demande nette pour les instances avec 30 jours et 4 produits | 82 |
| Figure 2.16 : Evolution du temps de résolution en fonction de la demande nette pour les instances avec 30 jours et 6 produits..... | 82 |

| | |
|--|-----|
| Figure 3.1 : Schéma de la méthode approchée proposée | 87 |
| Figure 3.2 : Représentation du volume des lots | 94 |
| Figure 3.3 : Procédure d'amélioration locale | 94 |
| Figure 3.4 : Schémas des étapes 1 et 2 de la méthode d'amélioration P1 | 96 |
| Figure 3.5 : Schéma d'une solution après l'application de la méthode P1 | 97 |
| Figure 3.6 : Transfert de volume, dans l'ordre croissant ou décroissant, entre les lots du produit p1 | 98 |
| Figure 3.7 : Arbre d'énumération correspondant au produit p1 avec un tri croissant « C » | 99 |
| Figure 3.8 : Application de l'étape 1 de la méthode d'amélioration P3..... | 101 |
| Figure 3.9 : Application de l'étape 2 de la méthode d'amélioration P3..... | 102 |
| Figure 3.10 : Etat du pipeline au début de l'horizon de planification | 104 |
| Figure 3.11 : Arbre correspondant au produit 1 | 106 |
| Figure 3.12 : Ordonnancement des lots après l'itération 1 de l'algorithme | 107 |
| Figure 3.13 : Lot créé et inséré à la séquence au cours à l'itération 25 de l'algorithme..... | 109 |
| Figure 3.14 : Arbre correspondant au produit 2 | 109 |
| Figure 3.15 : Suppression du dernier lot de la séquence courante à l'étape 1 de la procédure de réparation..... | 110 |
| Figure 3.16 : Création et insertion d'un nouveau lot après le processus de réparation à l'itération 27 de l'algorithme..... | 111 |
| Figure 3.17 : Ordonnancement des lots obtenu après l'évaluation au plus tôt..... | 114 |
| Figure 3.18 : Ordonnancement des lots obtenu après l'évaluation au plus tard..... | 115 |
| Figure 3.19 : Arbre d'énumération du produit 3 avec un tri décroissant « D » | 118 |
| Figure 3.20 : Transfert de volume selon le tri décroissant appliqué aux lots comportant le produit 5 | 119 |
| Figure 3.21 : Transfert de volume selon le tri décroissant appliqué aux lots comportant le produit 3 | 119 |
| Figure 4.1 : Schéma du réseau de pipelines OCP | 139 |
| Figure 4.2 : Structure du réseau de pipelines OCP..... | 181 |
| Figure 4.3 : Evolution du stock du groupe local lors du déchargement d'un lot ayant le volume maximum..... | 187 |
| Figure 4.4 : Evolution du stock du groupe export 1 lors du déchargement d'un lot ayant le volume maximum..... | 188 |
| Figure 4.5 : Evolution du groupe export 2 lors du déchargement du lot ayant le volume maximum..... | 189 |
| Figure 4.6 : Evolution du stock du groupe local et du groupe export 1 lors du déchargements des blocs de lots sur un horizon d'environ 4 jours | 194 |
| Figure 4.7 : Evolution du stock du groupe export 2 lors du déchargement des blocs de lots sur un horizon d'environ 4 jours..... | 195 |
| Figure 4.8 : Evolution du stock des trois groupes à la Station Terminale avec un débit des clients internes de 3500m ³ /h | 196 |
| Figure 4.9 : Evolution du stock des trois groupes à la Station Terminale avec un débit des clients internes de 2500m ³ /h | 196 |

| | |
|---|-----|
| Figure 4.10 : Diagramme de Gantt représentant les lots envoyés dans chaque pipeline du réseau OCP | 201 |
| Figure 4.11 : Evolution du stock du groupe local, du groupe export 1 et du groupe export 2 lors du déchargement des blocs de lots sur un horizon de 2 jours | 202 |
| Figure 4.12 : Matrices de compatibilité pour 4 et 5 produits | 205 |
| Figure 4.13 : Matrices de rinçage pour 4 et 5 produits..... | 206 |
| Figure 4.14 : Convergence du modèle linéaire pour l'instance 8 avec 2 jours et 5 produits . | 211 |
| Figure 4.15 : Convergence du modèle linéaire pour l'instance 8 avec 7 jours et 5 produits . | 211 |
| Figure 4.16 : Convergence du modèle linéaire pour l'instance 2 avec 7 jours et 5 produits . | 212 |
| Figure 4.17 : Convergence du modèle linéaire pour l'instance 2 avec 14 jours et 5 produits | 213 |
| Figure 4.18 : Convergence du modèle linéaire pour l'instance 2 avec 30 jours et 3 produits | 213 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 2.1 : Grille d'analyse des articles étudiés portant sur le problème d'ordonnement du pipeline « One-to-One » | 54 |
| Tableau 2.2 : Liste des critères d'optimisation utilisés par les articles étudiés | 55 |
| Tableau 2.3 : Données d'entrée relatives aux produits pour la génération d'instances | 71 |
| Tableau 2.4 : Matrice de compatibilité des produits | 72 |
| Tableau 2.5 : Performance du modèle linéaire pour les instances générées | 73 |
| Tableau 2.6 : Résultats concernant les instances avec un horizon de 30 jours et 4 produits ... | 74 |
| Tableau 2.7 : Résultats concernant les instances avec un horizon de 30 jours et 6 produits ... | 74 |
| Tableau 2.8 : Exemple d'ordonnement du pipeline « One-to-One » (instance 2 avec 30 jours et 6 produits)..... | 75 |
| Tableau 2.9 : <i>dem_nette</i> et temps de calcul pour les instances avec 30 jours et 4 produits... 81 | |
| Tableau 2.10 : <i>dem_nette</i> et temps de calcul pour les instances avec 30 jours et 6 produits. 82 | |
| Tableau 2.11 : Résultats concernant le temps de calcul pour les nouvelles instances créées de 30 jours..... | 83 |
| Tableau 3.1 : Données d'entrée d'une instance avec un horizon de planification de 30 jours et 6 produits..... | 103 |
| Tableau 3.2 : Matrice de compatibilité considérée pour 6 produits | 104 |
| Tableau 3.3 : Choix d'un produit de la « RCL_list » (itération 1 de l'algorithme) | 105 |
| Tableau 3.4 : détermination du volume d'un nouveau lot..... | 107 |
| Tableau 3.5 : Opérations de déchargement la séquence de lots à la fin de l'itération 1 | 108 |
| Tableau 3.6 : Niveau de stock après le déchargement de la séquence des deux lots | 108 |
| Tableau 3.7 : Identification des produits à insérer dans la « List_prod » à l'itération 26 de l'algorithme | 110 |
| Tableau 3.8 : Exemple d'une solution initiale avec les dates de déchargement | 112 |
| Tableau 3.9 : Critères d'optimisation de la solution initiale obtenue..... | 113 |
| Tableau 3.10 : Application de la méthode d'amélioration P1 | 117 |
| Tableau 3.11 : Application de la méthode d'amélioration P2 | 120 |
| Tableau 3.12 : Première étape de la méthode d'amélioration P3 | 121 |
| Tableau 3.13 : Deuxième étape de la méthode d'amélioration P3 | 123 |
| Tableau 3.14 : Comparaison entre la solution obtenue après la méthode d'amélioration et celle obtenue par le modèle linéaire..... | 125 |
| Tableau 3.15 : Divergence / Convergence du GRASP-like proposé | 127 |
| Tableau 3.16 : Résultats des enchaînements de procédures d'amélioration pour la nouvelle instance 7 avec 30 jours et 6 produits | 128 |
| Tableau 3.17 : Performance de la méthode d'amélioration..... | 129 |
| Tableau 3.18 : Performance de la méthode approchée pour les instances générées | 131 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 3.19 : Résultats de la meilleure exécution du GRASP-like pour les instances avec 30 jours et 6 produits | 132 |
| Tableau 3.20 : Résultats de la meilleure exécution du GRASP-like pour les instances avec 30 jours et 4 produits | 133 |
| Tableau 3.21 : Résultats de la meilleure exécution du GRASP-like pour les nouvelles instances créées avec un horizon de 30 jours | 134 |
| Tableau 4.1 : Grille d'analyse des articles étudiés portant sur le problème d'ordonnancement des réseaux de pipelines | 156 |
| Tableau 4.2 : Critères d'optimisation utilisés par les articles étudiés portant sur le problème d'ordonnancement des réseaux de pipelines | 158 |
| Tableau 4.3 : Capacité et stock initial des groupes de bacs | 182 |
| Tableau 4.4 : Débit des pipelines | 182 |
| Tableau 4.5 : Calcul du volume maximum d'un lot comportant le produit local K09L | 184 |
| Tableau 4.6 : Calcul du volume maximum d'un lot comportant un produit d'export | 189 |
| Tableau 4.7 : Capacité et stock initial des groupes de bacs | 190 |
| Tableau 4.8 : Informations sur les lots planifiés sur l'horizon de planification..... | 191 |
| Tableau 4.9 : Données d'entrée relatives aux produits | 197 |
| Tableau 4.10 : Données concernant les groupes de stockage..... | 197 |
| Tableau 4.11 : Données structurelles concernant les pipelines | 197 |
| Tableau 4.12 : Matrice de compatibilité des produits | 198 |
| Tableau 4.13 : Valeurs de la fonction objectif obtenues par le modèle linéaire | 198 |
| Tableau 4.14 : Ordonnancement des lots sur 2 jours, fourni par le modèle linéaire..... | 199 |
| Tableau 4.15 : Détermination du volume maximum des produits d'export à envoyer | 204 |
| Tableau 4.16 : Données relatives au stock initial pour la génération des instances..... | 205 |
| Tableau 4.17 : Performance du modèle linéaire avec une limitation de 5 heures..... | 207 |
| Tableau 4.18 : Performance du modèle linéaire avec une limitation de 15 minutes..... | 207 |
| Tableau 4.19 : Résultats concernant les instances avec 2 jours et 3 produits | 208 |
| Tableau 4.20 : Résultats concernant les instances avec 2 jours et 5 produits | 209 |
| Tableau 4.21 : Résultats concernant les instances avec 7 jours et 3 produits | 210 |
| Tableau 4.22 : Impact du débit des clients internes sur le temps de résolution, en considérant trois configurations d'un groupe avec 2 jours et 5 produits | 215 |
| Tableau 4.23 : Impact du nombre maximum de lots sur le temps de résolution, en considérant trois configurations d'un groupe avec 7 jours et 4 produits | 216 |

Introduction générale

La valeur importante des minerais et des métaux industriels pour la société d'aujourd'hui et de demain a largement été débattue durant les dernières décennies ((Krausmann *et al.*, 2009), (Mason *et al.*, 2011), (Graedel and Erdmann, 2012), (Vidal *et al.*, 2013)). En effet, l'industrie minière occupe une place fondamentale dans le renforcement de la croissance industrielle des sociétés. Cependant, les réserves ont diminué en raison de l'augmentation de l'activité minière, ce qui suscite de nombreuses inquiétudes concernant la disponibilité des ressources minérales sur le long terme, et par conséquent la viabilité à long terme de cette industrie. De ce fait, un contraste se manifeste par cette évolution : bien que la société ait de plus en plus besoin de certains produits fabriqués à partir de minéraux, elle n'accorde d'importance ni à la façon dont ces produits sont fabriqués, ni aux répercussions environnementales qui résultent des activités industrielles liées à leur production.

En particulier, l'industrie du phosphate contribue de manière significative au secteur agricole en fournissant des engrais riches en phosphore, considéré comme un élément important à la poussée de la végétation, en plus du potassium et de l'azote. Actuellement, la production de phosphate confrontée à un nombre d'obstacles, dans le cadre du développement durable, notamment relatifs à ce qui suit : la croissance démographique mondiale, la forte exploitation du minerai qui engendre une difficulté d'accès à celui-ci, la mauvaise gestion des terres cultivables qui dégrade leur qualité et l'instauration de nouvelles normes qui requiert une diminution du taux de certains éléments qui sont toxiques à l'environnement. Dans ce contexte, d'après (Hulse, 1995), en vue de réaliser une sécurité alimentaire durable, plusieurs pays sont confrontés à des obstacles liés principalement à la dégradation des terres arables, à la crise en eau douce, aux conflits internes et à la situation économique et sociale de leur secteur agricole.

Le cadre industriel dans lequel cette thèse a été effectuée est le Groupe OCP au Maroc. Il s'agit d'une entreprise qui se positionne en tant qu'acteur majeur sur le marché mondial des phosphates et de leurs dérivés. Le Groupe OCP est considéré comme premier exportateur mondial de phosphate sous toutes ses formes, notamment grâce à des réserves de phosphate connues parmi les plus importantes de la planète, et a une présence internationale par le biais de partenaires et de distributeurs d'engrais. L'entreprise offre plusieurs solutions pour ce qui est des produits de phosphate, d'acide phosphorique et des produits d'engrain, en intégrant tous les éléments de la chaîne de valeur. Cette industrie intégrée inclut plusieurs processus, à savoir : l'extraction minière, la valorisation et la transformation des minerais en l'acide phosphorique et en engrais.

Le Groupe OCP a mis en place une chaîne logistique complexe, organisée selon trois axes indépendants qui fonctionnent en parallèle : la chaîne Axe Nord regroupe le site minier de Khouribga, le pipeline principal qui transporte les produits de phosphate, le complexe chimique et le port de Jorf Lasfar ; la chaîne Axe Centre se compose des sites miniers de Benguerir et de Youssoufia, d'une voie ferroviaire, de la plateforme chimique et du port de Safi ; la chaîne Axe Sud comprend le site minier de Boucraâ, un convoyeur ainsi que le port de Laâyoune. Ces chaînes logistiques sont considérées comme hybrides, puisqu'elles regroupent entre des processus de production continus et discrets. Plusieurs stocks de matières premières et de produits intermédiaires sont présents dans l'ensemble des chaînes logistiques, afin d'assurer la connexion entre leurs différents sous-systèmes.

Face aux préoccupations liées à la sécurité alimentaire, le Groupe OCP a mis en œuvre une stratégie basée principalement sur l'accroissement des capacités de production, sur la bonne gestion du coût de revient, en réponse aux variations que connaît le marché mondial du phosphate. Par conséquent, grâce à la mise en œuvre de nouveaux processus et méthodes de production, l'entreprise compte améliorer la performance des activités de sa chaîne de valeur, de l'extraction minière jusqu'à la livraison maritime. Cette transformation en profondeur a généré de nouvelles problématiques qui peuvent être interconnectées, et en mesure d'inspirer des projets de recherche intéressants, notamment en management industriel.

De ce fait, les travaux réalisés dans cette thèse s'effectuent au sein du Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS) UMR CNRS 6158. De plus, cette thèse s'inscrit dans le cadre de la chaire d'optimisation industrielle rattachée à l'EMINES-*School of Industrial Management* (Université Polytechnique Mohammed VI) et au Groupe OCP. L'objectif de cette chaire est d'améliorer la coordination entre le pilotage et le contrôle stratégique des chaînes logistiques du Groupe OCP. La problématique identifiée porte sur l'ordonnancement du réseau de pipelines OCP se situant au niveau de sa chaîne Axe Nord. Elle peut être formulée sous forme de questions de recherche comme suit :

- A partir des demandes de produits finis de phosphate sur un horizon temporel fixé, comment obtenir, d'une part, la séquence de lots de produits finis à envoyer par pipeline, pour répondre à ces demandes, et comment déterminer, d'autre part, les dates de chargement et de déchargement de chaque lot de la séquence, en prenant en compte les contraintes de gestion de stock en aval ?
- Comment résoudre le problème d'ordonnancement du réseau de pipeline OCP en adaptant les solutions d'ordonnancement de pipelines trouvées dans la littérature, sachant que le système industriel étudié peut fonctionner selon deux cas, un cas de deux demandes au plus et un cas de plusieurs demandes, et qu'il est caractérisé par les éléments suivants : 1) les lots de produits finis envoyés dans le pipeline principal sont séparés par des volumes d'eau, 2) les bacs de stockage des produits externes en aval

sont polyvalents et 3) le remplissage et le soutirage des bacs de stockage en aval s'effectuent de manière simultanée ?

En vue de répondre à ses questions de recherche, nous avons mené nos travaux de recherche en adoptant une démarche de recherche action. Initiée en 1947 par le psychologue Lewin (Lewin, 1947), cette méthodologie a pour objectif de rapprocher la recherche du terrain. Elle permet, en partant d'un problème issu du terrain, de modéliser le système à étudier, afin d'apporter une meilleure compréhension de son fonctionnement, et de positionner le problème industriel à traiter par rapport aux travaux réalisés sur des problèmes similaires la littérature. Ensuite, en formulant des hypothèses simplificatrices, le problème industriel est ramené à un problème scientifique. L'étude de celui-ci est réalisée en proposant des méthodes de résolution exactes et/ou approchées en vue de fournir des solutions, avant d'effectuer la liaison avec le problème industriel.

De ce fait, partant du problème industriel identifié au niveau de la chaîne Axe Nord OCP, une modélisation des différents processus du système logistique considéré nous a permis d'appréhender l'organisation des flux afin de pouvoir fournir une bonne aide à la prise de décision, malgré la complexité du système. Ensuite, à partir de l'analyse de la littérature, nous avons positionné le problème industriel par rapport aux travaux traitant les problèmes d'ordonnancement des pipelines, en fonction de la structure du pipeline. En conséquence, la problématique industrielle est ramenée à deux problèmes d'ordonnancement à la fois, selon les demandes à satisfaire sur un horizon de planification bien déterminé :

- Le Problème d'Ordonnancement des Pipelines linéaires Multiproduits de type « one-to-one » (POPM-T1) est considéré lorsque le réseau de pipeline OCP opère pour satisfaire deux demandes au plus ;
- Le Problème d'Ordonnancement de Réseau de Pipelines de type « tree-structure » (PORP-TS) est concerné quand le réseau de pipeline OCP fonctionne en vue de répondre à plusieurs demandes sur l'horizon temporel considéré.

Ainsi, les travaux de recherche réalisés sont présentés dans ce manuscrit selon quatre chapitres :

- Le premier chapitre introduit les notions importantes pour bien comprendre cette thèse. Il fournit une description des processus de la chaîne logistique du Groupe OCP SA. Puis, il présente la problématique industrielle traitée dans cette thèse, qui est définie dans le cadre des problèmes d'ordonnancement des pipelines. Ensuite, un état de l'art sur les problèmes d'ordonnancement des pipelines selon la structure du pipeline est présenté. A partir de celui-ci, la problématique industrielle est ramenée à deux problèmes d'ordonnancement : le problème d'ordonnancement des pipelines linéaires multiproduits de type « one-to-one » (POPM-T1) et le problème d'ordonnancement de

réseau de pipelines de type « tree-structure » (PORP-TS). Enfin, les méthodes de résolution sont décrites en dernier.

- Le second chapitre s'intéresse au Problème d'Ordonnement du Pipeline Multiproduit de type « one-to-one » (POPM-T1) dans le contexte de l'industrie pétrolière. Il présente une définition du problème étudié ainsi que les travaux de recherche qui traitent celui-ci. Par la suite, un programme linéaire mixte est présenté, qui vise à fournir un ordonnancement des lots pour satisfaire une demande des clients sur un horizon temporel fixé, tout en maximisant le volume des lots planifiés, et en minimisant le volume total contaminé entre les lots. Ce modèle linéaire peut être adapté au cas de l'OCP, dans le contexte de l'industrie minière, en modifiant certains paramètres d'entrée. Enfin, plusieurs expérimentations numériques sont présentées dans l'objectif de prouver que le modèle linéaire proposé peut être applicable dans le contexte industriel, avec un horizon de planification allant jusqu'à un mois.
- Le troisième chapitre aborde également le (POPM-T1) et présente une méthode approchée pour l'étudier. Celle-ci est composée de deux parties : une méthode de construction et une méthode d'amélioration locale. La méthode de construction est une heuristique gloutonne randomisée qui construit une solution initiale de manière itérative. La solution initiale est sous forme d'une séquence des lots à transporter dans le pipeline, chaque lot ayant un volume, comportant un produit et possédant une date de chargement et déchargement. Par la suite, la méthode d'amélioration est appliquée en vue d'améliorer la qualité de la solution initiale : elle vise toute augmentation possible du volume des lots sans modifier leur séquencement. Un exemple d'application est ensuite détaillé pour mieux illustrer les étapes de la méthode approchée. La méthode approchée proposée dans ce chapitre peut également être adaptée au cas de l'OCP, de manière similaire au modèle linéaire présenté au chapitre 2. Enfin, des expérimentations numériques sont mise en évidence afin d'analyser la performance de la méthode approchée, et de comparer ses solutions avec celles fournies par le modèle linéaire proposé au chapitre 2.
- Le quatrième chapitre traite du Problème d'Ordonnement du Réseau de Pipelines de type « tree-structure » (PORP-TS), lié au Groupe OCP dans le contexte de l'industrie minière. Il présente tout d'abord une définition du problème ainsi qu'un état de l'art en relation avec les problèmes d'ordonnement des réseaux de pipelines. Ensuite, un programme linéaire mixte est présenté. Son objectif est de fournir un ordonnancement des lots dans le réseau de pipelines du Groupe OCP, pour satisfaire la demande des différents clients sur un horizon de planification fixé, tout en maximisant le volume des lots, et en minimisant le nombre de blocs des lots. Finalement, plusieurs tests sont

présentés en vue d'évaluer la performance du modèle linéaire, à partir d'instances basées sur des scénarios réels, dont certaines avec un horizon de planification à court terme, et d'autres avec un horizon temporel atteignant un mois.

Les travaux de recherche effectués ont donné lieu à une soumission dans une revue internationale, à six communications dans des congrès internationaux et à une présentation dans une conférence industrielle. La liste des publications scientifiques réalisées au cours de cette thèse est présentée ci-dessous :

Publications dans une revue internationale à comité de lecture

- Meryem BAMOUMEN, Selwa ELFIRDOUSSI, Libo REN, Nikolay TCHERNEV, (2021). An efficient GRASP-like algorithm for the multi-product straight pipeline scheduling problem. (publié dans le journal Computers & Operations Research (COR)) <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106082>

Conférences internationales

- M. Bamoumen, S. Belil, S. Kemmoé, N. Tchernev, (2018), An Optimization Approach for a Strategic Balance of Supply and Demand in the Process Industry of Bulk Materials, ILS 2018, International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, pp. 453-462, Lyon, France, July 8-11 2018.
- Meryem BAMOUMEN, Selwa ELFIRDOUSSI, Libo REN, Nikolay TCHERNEV, (2019), Une heuristique pour l'ordonnancement des phosphates dans un pipeline multiproduits, CIGI 2019, 13e Conférence internationale de CIGI QUALITA, 25-28 juin 2019.
- M. Bamoumen, S. Belil, S. Elfirdoussi, L. Ren, N. Tchernev, (2019). A hybrid heuristic for the multi-product straight pipeline scheduling problem, In 10th IFAC MIM conference on Manufacturing Modeling, Management and Control 2019, 28-30 août, IFAC-PapersOnLineVolume 52(13) pp. 535-540, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.188>
- Bamoumen, M., Elfirdoussi, S., Ren, L., Tchernev, N., (2020). An efficient heuristic for the multi-product straight pipeline scheduling problem, In 8th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, ILS Conference 2020, 22-24 avril, Austin, USA, pp. 244-251. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.106082>
- 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. In: Dolgui A., Bernard A., Lemoine D., von Cieminski G., Romero D. (eds) Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems. APMS 2021, 05-09 septembre, Nantes, France, IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 632. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85906-0_34.

- Meryem BAMOUMEN, Selwa ELFIRDOUSSI, Libo REN, Nikolay TCHERNEV, (2022). Continuous time and volume batch formulation for the multiproduct pipeline network scheduling problem, In 10th IFAC MIM conference on Manufacturing Modeling, Management and Control 2022, 22-24 juin, Nantes, France. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.048>

Conférences industrielles

- Participation à PHORESNET 2018, International Conference for Research on Phosphate and Derivatives, via un poster : A greedy heuristic based approach for the multiproduct pipeline scheduling, 12-13 novembre, Benguerir, Maroc.

Chapitre 1

Présentation de la problématique

Sommaire

| | | |
|-------|---|----|
| 1.1 | Introduction..... | 7 |
| 1.2 | Contexte industriel..... | 8 |
| 1.2.1 | Structure du Groupe OCP..... | 8 |
| 1.2.2 | Stratégies du Groupe OCP..... | 10 |
| 1.2.3 | Organisation de la chaîne Axe Nord OCP..... | 12 |
| 1.3 | Problématique..... | 17 |
| 1.3.1 | L'ordonnancement du réseau de pipeline OCP..... | 17 |
| 1.3.2 | Les problèmes d'ordonnancement de pipeline dans la littérature..... | 18 |
| 1.3.3 | Les problèmes d'ordonnancement au cœur de la thèse..... | 26 |
| 1.4 | Méthodes de résolution..... | 30 |
| 1.4.1 | Méthodes de résolution exactes..... | 30 |
| 1.4.2 | Méthodes de résolution approchées..... | 32 |
| 1.5 | Conclusion..... | 37 |

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le contexte industriel, qui concerne le Groupe OCP, et au sein duquel ont été menés les travaux de recherche actuels, ainsi que la planification et l'ordonnancement des chaînes logistiques en tant d'objet de notre investigation. De plus, ce chapitre vise à définir la problématique de recherche soulevée dans le cadre de cette thèse. Cette problématique porte sur l'ordonnancement du réseau de pipeline multiproduit de l'OCP dans la chaîne logistique Axe Nord de l'entreprise. Afin de répondre à cette problématique, la première réflexion nous a conduits à analyser les différents problèmes d'ordonnancement des pipelines traités dans la littérature. A l'issue de cette analyse, une étude plus approfondie sera menée sur les deux problèmes suivants : le problème d'ordonnancement des pipelines linéaires multiproduits de type « one-to-one » (une source et une destination) et le problème d'ordonnancement des réseaux de pipelines de type « tree-structure ».

De ce fait, l'organisation de ce chapitre est réalisée comme suit : la section 1.2 donne une description du contexte industriel, où sont présentées l'organisation du Groupe OCP, les stratégies pour faire face aux défis auxquels le groupe est confronté, ainsi que la structuration de sa chaîne logistique Axe Nord. La section 1.3 porte sur la présentation de la structure du réseau de pipeline OCP, en tant que sous-système de la chaîne logistique de l'Axe Nord, sur la

définition de la problématique industrielle, puis sur la description des différentes structures des systèmes considérés pour l'ordonnement des pipelines, et en dernier lieu sur la présentation des problématiques scientifiques qui découlent de la problématique industrielle. La section 1.4 aborde les différentes méthodes de résolution utilisées pour la résolution des problèmes d'ordonnement des pipelines dans la littérature.

1.2 Contexte industriel

1.2.1 Structure du Groupe OCP

Le Groupe OCP a réussi à s'imposer comme l'un des leaders mondiaux sur le marché des phosphates et ses dérivés depuis sa fondation en 1920. Il offre des solutions pour divers produits de phosphate, d'acide phosphorique et d'engrais, en incorporant tous les éléments de la chaîne logistique. Cette chaîne intégrée comprend les processus d'extraction minière et de traitement, ainsi que la conversion des minerais valorisés en engrais via l'acide phosphorique. Avec environ un tiers du marché, le Groupe OCP est considéré comme premier exportateur mondial du phosphate et de ses dérivées (voir Annexe 1).

De plus, le Groupe OCP entend renforcer sa position parmi les producteurs mondiaux en se basant sur une stratégie d'exploitation durable des phosphates, grâce notamment à ses réserves en phosphate estimées à plus de 70% des réserves mondiales, avec 50 millions de tonnes environ en 2020 (selon « *U.S Geological Survey* » (USGS)). En vue de faire face à la croissance anticipée des besoins mondiaux en engrais, le groupe OCP compte mettre en œuvre ses objectifs en se basant sur les principes de l'industrie agricole, qui reposent sur la nécessité d'accroître la productivité agricole en raison de la croissance démographique mondiale.

Le Groupe OCP renforce sa présence mondiale et la viabilité commerciale de sa gamme de produits diversifiés, en collaborant avec plus de 350 clients répartis partout dans le monde. En effet, le Groupe OCP reste leader mondial avec 35% de part de marché réalisé en 2020 dans les exportations mondiales du phosphate sous toutes ses formes (rapport d'activité de l'OCP 2020). Ses ventes sont réalisées sur les 5 continents, notamment l'Afrique (54%), l'Europe (41%), l'Amérique du Nord (28%), l'Amérique du Sud (46%), l'Asie du Sud et Moyen Orient (32%), l'Asie de l'Est (7%) et l'Océanie (15%).

Par ailleurs, la production du phosphate sous toutes ses formes s'élève à 59 millions de tonnes en 2020, et se traduit par un chiffre d'affaires consolidé qui atteint 5.62 milliards d'Euros (56.2 milliards de Dirhams) (rapport d'activité de l'OCP 2020). Ce chiffre d'affaires consolidé a connu une augmentation d'environ 4% en comparaison avec l'année 2019, et est reparti par produit comme suit : 58% pour les engrais phosphatés, 17% pour la roche phosphatée, 14% pour l'acide phosphorique et 11% pour d'autres produits.

Les activités du Groupe OCP englobent toute la chaîne de valeur des phosphates, en partant des mines jusqu'aux ports. L'entreprise met en œuvre ses objectifs de production et

d'exportation au niveau de trois chaînes indépendantes (voir Figure 1.1), comptant un total de quatre sites miniers, deux plateformes chimiques et quatre port, regroupés comme suit :

- La chaîne « Axe Nord » : elle comporte le site minier de Khouribga, deux modes de transport (par « slurry pipeline », une canalisation de 187 Km de longueur et de 90 cm de diamètre, et par voie ferroviaire), le site de transformation et le port de Jorf Lasfar. Le processus d'extraction a commencé en premier lieu au niveau du site de Khouribga. Actuellement, ce site minier contient la plus grande réserve de phosphate au Maroc, avec 43%. Après extraction du minerai extrait, celui-ci est acheminé soit par le « slurry pipeline » vers la plateforme chimique à Jorf Lasfar, soit par train pour être exporté au niveau du port de Casablanca.
- La chaîne « Axe Centre » : elle se compose des différents sites miniers de Benguerir et Youssoufia, d'une voie ferrée, de la plateforme chimique et du port de Safi. Le site minier de Benguerir est considéré comme l'une des importantes mines à ciel ouvert de l'entreprise, notamment en matière de recherche et d'exploitation minière. De plus, les sites miniers de Benguerir et de Youssoufia constituent le site de Gantour, considéré comme la troisième plus grande mine de phosphate au niveau mondial. Les minerais extraits des sites miniers de l'Axe Centre sont transportés par train à la plateforme chimique de Safi, où ils sont convertis en acides et en engrais, avant être exporté au niveau du port de Safi.
- La chaîne « Axe Sud » : elle comprend le site minier de Boucrâa, un convoyeur et le port de Laâyoune. La roche phosphatée extraite de la mine de Boucrâa est acheminée par un convoyeur d'une longueur de 102 Km, considéré comme un record mondial, vers le site de traitement de Laâyoune avant être exporté au niveau du port de Laâyoune. Par ailleurs, le Groupe OCP envisage la mise en œuvre d'une usine de production d'engrais sur le site de Laâyoune.

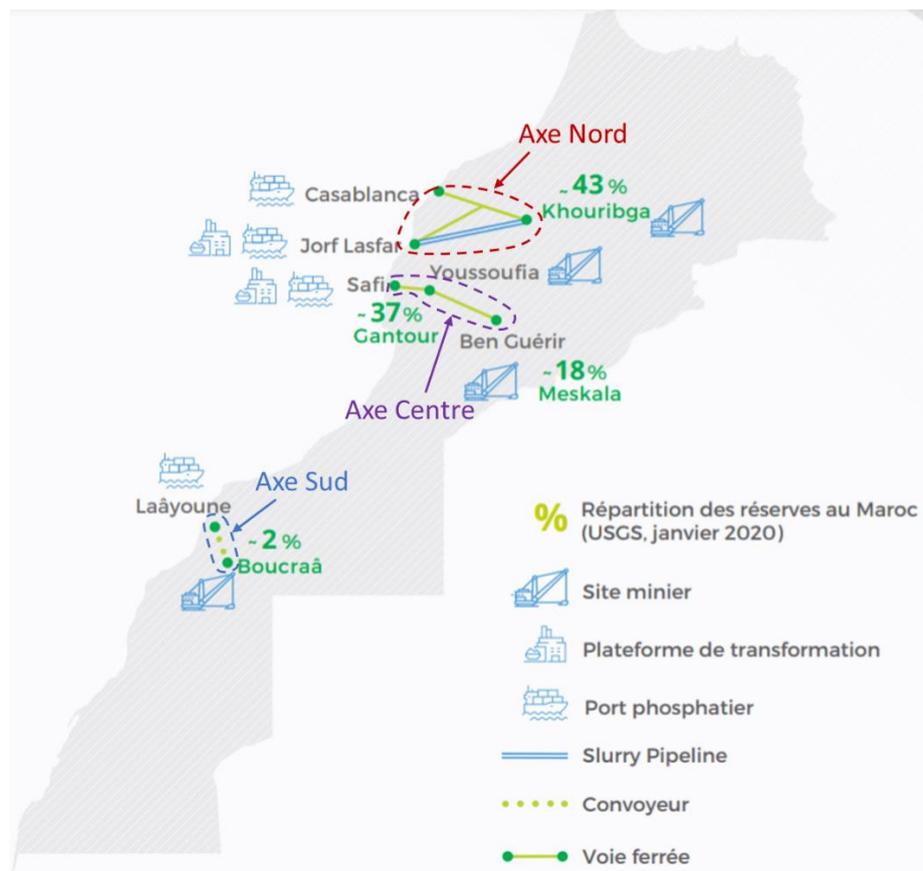


Figure 1.1 : Chaînes logistiques du Groupe OCP

1.2.2 Stratégies du Groupe OCP

Il s'avère important d'utiliser les réserves de phosphate de façon responsable, dans le cadre du développement durable, vu que le minerai du phosphate est considéré comme une ressource non renouvelable. Actuellement, selon les estimations de l'« *U.S Geological Survey* » (USGS), il est encore possible d'exploiter les réserves de phosphate, en comptant les ressources de l'océan Atlantique et de l'océan Pacifique, pendant une période allant jusqu'à douze siècles.

Le Groupe OCP a opté pour une stratégie axée principalement sur la production d'engrais, vu leur forte valeur ajoutée, en prévoyant des produits personnalisés en fonction de la constitution du sol. Cette stratégie est mise en œuvre compte tenu des enjeux de la sécurité alimentaire et du développement durable, ce dernier étant une composante majeure de cette stratégie. Dans ce contexte, le Groupe OCP a démarré en 2008 un projet d'investissement de 20 milliards d'Euros (200 milliards de Dirhams), et s'étendant sur dix ans, afin d'accompagner les transformations envisagées par l'entreprise.

En effet, au niveau mondial, l'entreprise a pu collaborer avec différents pays africains, en concluant des partenariats, en vue de mettre en œuvre des sites de production d'engrais sur leur sol. De plus, au niveau national, le Groupe OCP vise à augmenter les capacités de ses infrastructures manufacturières et portuaires, à mettre en place de méthodes innovantes

notamment pour le transport (par exemple le « slurry pipeline¹ »), ainsi qu'à créer des produits innovants selon la composition des sols.

En adhérant à son projet d'investissement, le Groupe OCP entend accomplir les objectifs suivants :

- L'accroissement de la capacité minière en vue d'augmenter la production de la roche phosphatée aux environs de 2028, et atteindre 55 millions de tonnes par an. Pour y parvenir, la société a inauguré de nouvelles mines, a mis en place de nouveaux sites de traitement sur les trois axes d'exploitation et a élargi la capacité de production des unités déjà en service.
- Pour obtenir 50% de la part de marché des engrais, le Groupe OCP envisage d'augmenter sa capacité de transformation. Dans ce contexte, il prévoit de mettre en place des usines intégrées sur le site de transformation de Jorf Lasfar pour la production des engrais, et vise à créer nouveaux sites chimiques sur les axes centre et sud.
- La mise en œuvre de nouveaux moyens de transport, notamment les pipelines, permettra d'augmenter l'efficacité industrielle du Groupe OCP. En effet, en plus du « slurry pipeline » mis en place sur la chaîne Axe Nord, l'entreprise envisage de construire, sur la chaîne Axe Centre, de nouveaux pipelines pour acheminer le minerai des mines jusqu'aux sites chimiques et/ou unités de traitement, et pour transporter l'acide phosphorique des unités de traitement jusqu'aux sites chimiques.
- L'élargissement des capacités logistiques des ports existants, en construisant de nouveaux dépôts et en implémentant de nouveaux quais d'accostage sur les chaînes axe nord et axe centre. Par ailleurs, il est prévu de démarrer un nouveau port au niveau de la chaîne axe Sud.

Ce projet d'investissement permet au Groupe OCP de réorganiser toutes ses usines de production et ses sites miniers, notamment au niveau de l'axe nord et de l'axe centre, en termes de méthodes, de processus et de ressources utilisées.

En adoptant un mode de production en flux tendu, le Groupe OCP sera en mesure d'accroître la capacité de production au niveau de la chaîne Axe Nord, à travers la mise en service du « slurry pipeline », en vue d'atteindre 38 millions de tonnes par an. Dans cette perspective, afin d'améliorer la satisfaction des clients de façon efficace et efficiente tout au long de cette phase de réinvention, le Département de Programmation et de Gestion des Flux est considéré comme un acteur essentiel assurant la coordination entre les unités de production de la chaîne Axe Nord.

Néanmoins, assurer une gestion efficace d'un tel réseau de pipeline reste un défi scientifique et est une préoccupation majeure pour les responsables industriels au sein du

¹ Il s'agit d'un pipeline qui transporte de la pulpe, c'est-à-dire un mélange entre l'eau et le produit de phosphate

Département de Programmation et de Gestion des Flux du site minier de Khouribga. Notre projet de recherche s'inscrit dans ce contexte du Groupe OCP durant cette période de transition. Il a pour objectif d'étudier des problématiques de recherche pouvant déboucher sur des solutions industrielles permettant d'assurer une gestion plus efficace du réseau de pipeline OCP.

1.2.3 Organisation de la chaîne Axe Nord OCP

La chaîne Axe Nord OCP, illustrée par la Figure 1.2, se compose de plusieurs sous-ensembles :

- Le sous-ensemble 1 concerne le site minier de Khouribga ;
- Le sous-ensemble 2 comporte la plateforme chimique, l'unité du Downstream et le port de Jorf, situés tous à Jorf Lasfar ;
- Le sous-ensemble 3 comprend le port de Casablanca.

Les ports de Jorf Lasfar et de Casablanca sont utilisés pour livrer les clients externes. Le complexe chimique comporte plusieurs usines de production d'acide phosphorique et d'engrais. Ces usines de production sont des clients internes ayant comme besoin la roche phosphatée produite par le site minier de Khouribga.

Le site de Khouribga comporte plusieurs entités, à savoir :

- Trois mines à ciel ouvert où sont extraits les minerais de phosphate, qui sont désignés par produits primaires ;
- Trois laveries qui assurent le traitement des produits primaires, pour obtenir en sortie des produits intermédiaires ;
- Plusieurs surfaces pour stocker les produits primaires et les produits intermédiaires ;
- Une unité de séchage qui dispose de plusieurs fours pour sécher les produits primaires et intermédiaires en réduisant leur taux d'humidité. Elle permet également de fabriquer les produits finis en réalisant le mélange entre les produits primaires et intermédiaires ;
- La station de tête comprend des bacs de stockage pour mélanger les produits intermédiaires reçus, et obtenir par conséquent les produits finis.

Le site minier de Khouribga permet de répondre aux demandes des clients internes au niveau du complexe chimique de Jorf Lasfar, et des clients externes au niveau des ports de Jorf Lasfar et de Casablanca. La demande des clients est exprimée pour un total de 8 produits finis : le produit local, désigné par (K09L) et qui est spécifique aux clients internes, et 7 produits externes (K01, K02, K08, K09DS, K10, K12, K20) destinés aux clients externes au niveau des ports de Jorf Lasfar et de Casablanca.

L'acheminement des minerais de phosphate traités et mélangés, considérés comme produits finis, est réalisé par l'intermédiaire des deux modes de transport suivants :

- Une voie ferrée qui permet de transférer les produits finis depuis les stocks disponibles en sortie de l'unité de séchage jusqu'au port de Casablanca, pour les charger dans les navires des clients externes ;
- Un réseau de pipelines qui assure l'acheminement des produits finis, présents dans les bacs de stockage de la station de tête, sous forme de pulpe (désignée par « slurry », c'est-à-dire un mélange entre l'eau et le produit de phosphate), vers les clients internes au niveau de la plateforme chimique de Jorf, et les clients externes au port de Jorf.

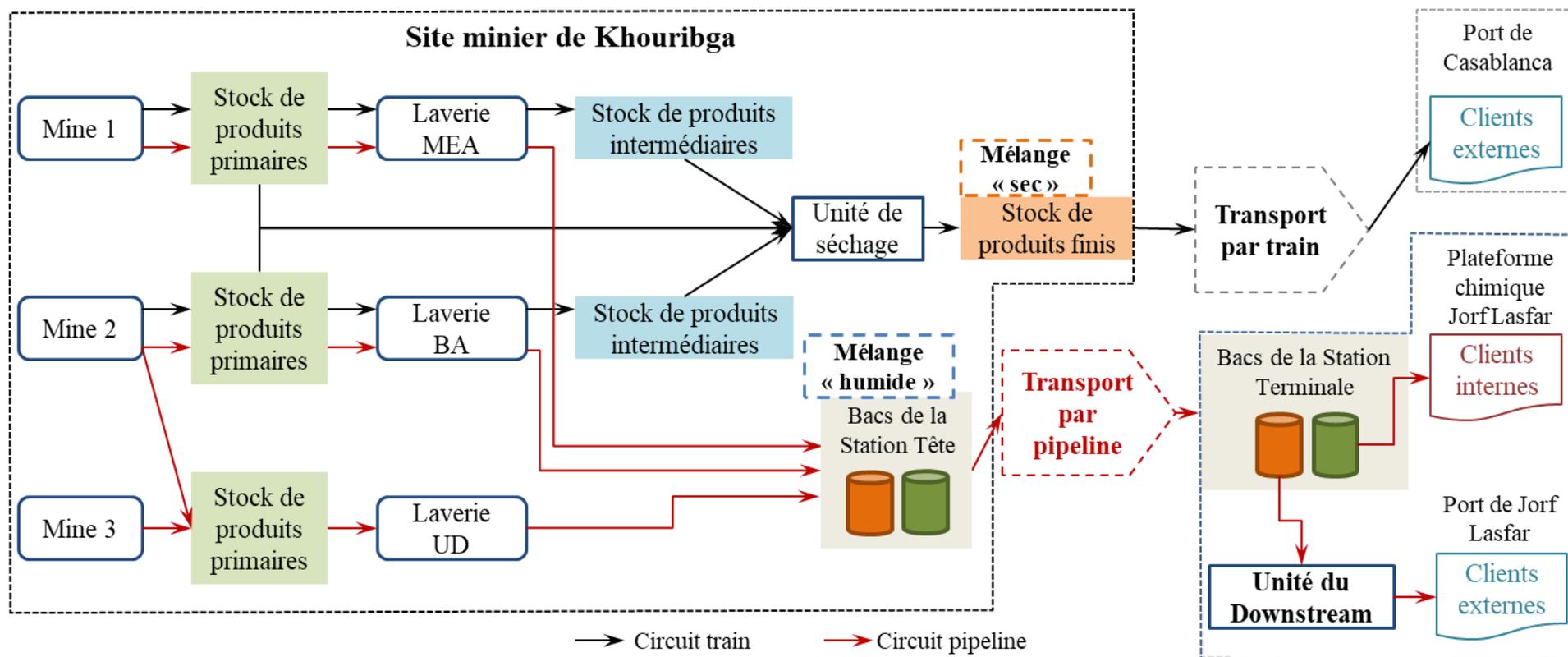


Figure 1.2 : Schéma de flux de la chaîne Axe Nord OCP

Notre intérêt porte sur le mode de transport avec le réseau de pipeline, où l'acheminement des produits finis, depuis la station de tête à Khouribga jusqu'à la station terminale à Jorf Lasfar, est réalisé en flux continu par le « slurry pipeline », appelé également pipeline principal, de 187 Km de longueur et de 90 cm de diamètre.

Chaque produit fini est constitué de plusieurs composants, notamment le BPL (Bone Phosphate Lime). Un produit fini est fabriqué en respectant les exigences de la charte qualité d'un client, en termes des différents composants, qui doivent être compris entre une borne minimale et une borne maximale.

La caractérisation des produits primaires disponibles à l'entrée des laveries est également réalisée, en considérant les mêmes composants que les produits finis. Ensuite, les produits primaires sont traités en lots dans les laveries. Le processus de traitement dans une laverie permet de fabriquer, à partir d'un lot de produit primaire, un lot de produit intermédiaire en sortie. Les spécificités obtenues de ce dernier, en termes de volume et de composition, sont en fonction, d'une part, de celles du produit primaire, et d'autre part, du mode de lavage choisi. Pour chaque laverie, on distingue trois modes de lavage : lavage simple, lavage-flottation et lavage-broyage-flottation. Ces modes peuvent comporter une opération (i.e. lavage simple), deux opérations (i.e. lavage-flottation) ou trois opérations de traitement (i.e. lavage-broyage-flottation). Plus un lot de produit primaire subit plusieurs opérations de traitement, plus sa qualité est améliorée, en termes de composition chimique, et plus son volume est réduit.

Les laveries du site minier de Khouribga comprennent un total de cinq lignes de production : la laverie BA et la laverie MEA possèdent deux lignes chacune, tandis que la laverie UD comporte une seule ligne. Les débits de production des cinq lignes en entrée et en sortie sont fournis sur la Figure 1.3.

La présence de bacs de stockage pour recevoir les produits en pulpe s'explique par la différence du débit des flux en entrée et en sortie de chaque entité (laveries, station de tête et station terminale).

L'organisation de l'ensemble des processus est réalisée selon deux cas possibles :

- Le cas de monoproduction qui mobilise les cinq lignes de production pour fabriquer le produit local K09L ;
- Le cas de multi-production qui permet de combiner la fabrication de deux ou plusieurs produits finis, c'est-à-dire le produit local (K09L) et d'autres produits externes à partir de groupes de lignes de production prédéfinis.

Une fois les produits intermédiaires obtenus à la sortie des laveries, ils sont transportés par les pipelines secondaires aux bacs de la station de tête, où ils sont réunis, selon des mélanges prédéfinis. Le mélange obtenu constitue un produit fini qui sera transporté par la suite dans le pipeline principal, sous forme de lot, pour répondre à une demande en aval.

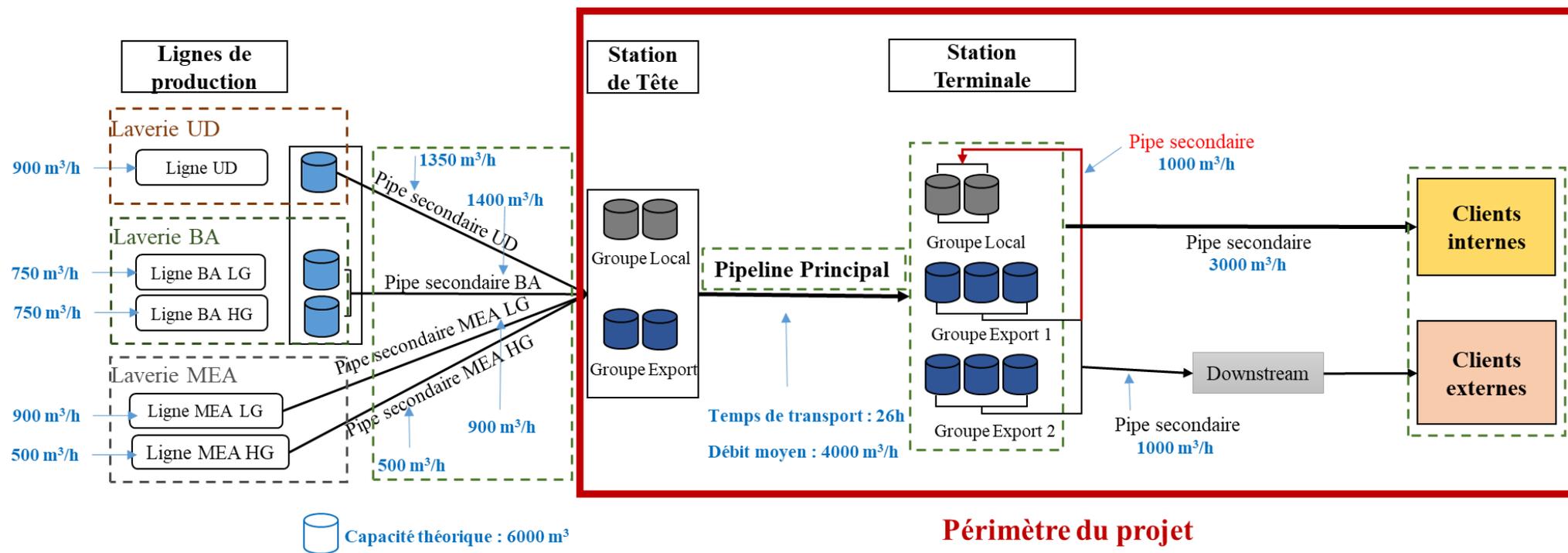


Figure 1.3 : Le réseau de pipelines l'OCP

Dans ce manuscrit, nous nous concentrons exclusivement sur l'ordonnancement du réseau de pipelines, qui débute de la station de tête jusqu'aux clients internes et externes (i.e. le périmètre du projet cadré en rouge dans la Figure 1.3) comme illustré dans la partie suivante. Les décisions concernant la détermination des mélanges des produits intermédiaires sortent du cadre de notre travail.

1.3 Problématique

1.3.1 L'ordonnancement du réseau de pipeline OCP

Le réseau de pipelines OCP est constitué d'un pipeline principal et de plusieurs pipelines secondaires. Ceux-ci transportent les produits finis de phosphate de la station de tête jusqu'aux clients internes et externes, en passant par la station terminale, et par l'unité du Downstream pour les produits externes (voir périmètre du projet dans la Figure 1.3). Cette unité reçoit les produits finis arrivés de la station terminale, en vue de les sécher, avant de les livrer aux clients externes.

Les produits finis sont acheminés dans le pipeline principal pour être déchargés dans des bacs de stockage repartis en groupes à la station terminale. On compte 3 groupes de stockage : le groupe local, le groupe export 1 et le groupe export 2. Le groupe local est dédié au produit local (K09L). Les deux groupes export 1 et 2 sont polyvalents et ont été initialement installés afin de recevoir les produits d'export. Cependant, puisqu'il y a une demande forte du produit local K09L, le groupe export 1 est exploité actuellement pour accueillir le produit local. De plus, le transfert du produit local du groupe export 1 au groupe local est réalisé par un pipeline secondaire qui lie entre les deux groupes.

A la station de tête, le transport des produits s'effectue en chargeant une séquence de lots dans le pipeline principal. Chaque lot contient un seul produit et possède un volume. De plus, un volume d'eau est injecté entre chaque paire de lots, afin d'empêcher la contamination des produits et de distinguer chaque lot lors de son déchargement à la station terminale.

Actuellement, l'ordonnancement des lots de produits finis dans le réseau de pipelines OCP s'effectue par une programmation manuelle de chaque lot, soit en utilisant l'outil Excel, soit en s'aidant du logiciel de planification « Quintiq » créé par une société tierce.

L'ordonnancement à l'aide de l'outil Excel est effectué lorsqu'il y a au plus deux demandes communiquées sur l'horizon de planification. Dans ce cas, l'ordonnancement du réseau de pipelines est réalisé afin de satisfaire la demande en produit local K09L et une demande de client externe. Cet ordonnancement s'effectue de manière empirique et sur la base de l'expérience des planificateurs.

En ce qui concerne l'ordonnancement du réseau de pipeline multiproduit, avec un local (K09L) et plusieurs produits externes, le responsable de planification à l'OCP utilise l'outil

« Quintiq ». Il s'agit d'une application qui se base sur la règle de « *drag and drop* » des volumes des lots afin de réaliser manuellement un ordonnancement. A chaque étape de « *drag and drop* », l'outil contrôle si les contraintes relatives aux capacités de stockage sont respectées, afin de valider le volume du lot choisi. Concernant l'évaluation des mélanges, l'outil considère les produits primaires disponibles à l'entrée des laveries ainsi qu'une liste de mélanges, tous fournis comme données d'entrée. Le choix du mélange pour chaque laverie est réalisé en considérant seulement le composant BPL.

L'outil « Quintiq » est capable de fournir un ordonnancement avec un maximum de deux produits finis (dont un local K09L et un externe) sur un horizon de planification limité à une semaine. Dans le cas où l'on souhaite satisfaire les demandes de plus de deux produits finis, il s'avère impossible d'effectuer l'ordonnancement du réseau de pipelines avec l'outil actuel.

De ce fait, en considérant le réseau de pipelines de l'OCP, l'objectif est de proposer des méthodes et des outils d'aide à la décision pour l'ordonnancement du réseau de pipeline OCP, en fournissant des solutions industrielles qui permettent de répondre à la demande des différents clients (internes et externes) sur un horizon temporel prédéfini, tout respectant les contraintes techniques du système et en maximisant le volume des lots retenus.

Plus précisément, l'ordonnancement du réseau de pipeline OCP revient à déterminer, à partir des demandes des clients internes externes sur un horizon de planification fixé, les éléments suivants :

- Les lots à injecter dans le pipeline principal durant l'horizon temporel, ainsi que le type de produit à retenir et le volume pour chaque lot ;
- Les dates de début et fin de chargement/déchargement des lots à la station de tête/terminale ;
- Le niveau de stock des groupes de stockage à la station terminale après le déchargement des lots.

Nous avons montré que le problème industriel considéré est lié au thème de la planification et de l'ordonnancement des systèmes industriels, et spécifiquement aux problèmes d'ordonnancement des pipelines. Avant de plonger au cœur de la problématique, il est essentiel d'effectuer une revue de la littérature sur les problèmes d'ordonnancement des pipelines dans des domaines industriels similaires à notre cas.

1.3.2 Les problèmes d'ordonnancement de pipeline dans la littérature

L'analyse de la littérature révèle que la majorité des travaux de recherche s'intéressent à l'étude des problèmes d'ordonnancement des pipelines dans cadre de l'industrie pétrolière. Les systèmes considérés dans les travaux précédents peuvent se composer d'un ou plusieurs pipelines, qui relie entre une ou différentes sources à une ou plusieurs destinations, désignés par centres de distribution.

Les principaux défis auxquels sont confrontés les planificateurs de tels systèmes étudiés sont les niveaux élevés de la demande de produits au niveau des centres de distribution (Rejowski and Pinto, 2003). Les demandes doivent être satisfaites en fonction des niveaux de stock dans les sources et dans les destinations, ainsi que de la capacité du pipeline.

En conséquence, la gestion correcte des centres de distribution nécessite fondamentalement une décision majeure à chaque période de temps, à savoir le transfert des produits vers les marchés de consommation. Les contraintes sont imposées par les limites inférieures et supérieures des bacs de stockage, et par les dates de chargement et de déchargement des lots. Le manque de produits dans les bacs de stockage affecte les consommateurs locaux, tandis que l'excès peut paralyser le transfert dans les pipelines (i.e. arrêt des pipelines), et même interrompre la production au niveau des sources (Sasikumar et al., 1997).

De plus, le fonctionnement des pipelines multiproduits présente une caractéristique unique qui est la contamination des produits. Celle-ci est causée par le fait que les différents lots de produits peuvent être transportés par pipeline sans aucune séparation physique. La contamination se produit donc à l'interface de deux lots de produits successifs. D'autres contraintes sont prises en compte pour réaliser l'ordonnancement des pipelines multiproduits, à savoir le respect du temps de stabilisation des produits déchargés aux centres de distribution, ainsi que le respect des séquences autorisées et interdites des lots à injecter, selon les produits choisis.

Par ailleurs, à travers les deux dernières décennies, les problèmes d'ordonnancement des pipelines traités sont devenus de plus en plus complexes, en raison de la complexité des structures des pipelines. En effet, d'après (Li et al., 2021), la recherche sur l'ordonnancement des pipelines comprend des structures basées sur des pipelines linéaires, et sur des réseaux de pipelines. De plus, (Magatão et al., 2015) et (Li et al., 2021) proposent une classification des problèmes d'ordonnancement des pipelines selon cinq catégories de structures de pipelines suivantes :

- Pipeline linéaire de type « one-to-one » : relie entre une source et une destination (Relvas et al., 2006), (Cafaro and Cerdá, 2008), (MirHassani and BeheshtiAsl., 2013), (Kirschstein, 2018)) ;
- Pipeline linéaire de type « one-to-many » : relie une source et plusieurs destinations ((Rejowski and Pinto, 2003), (Cafaro and Cerdá, 2004), (Cafaro et al., 2011), (Zaghian and Mostafaei, 2016)) ;
- Pipeline linéaire de type « many-to-many » : relie entre plusieurs sources et plusieurs destinations ((MirHassani et al., 2013), (Cafaro et al., 2015), (Liao et al., 2019a)) ;
- Réseau de pipelines de type « tree-structure » : plusieurs pipelines connectent une source à différentes destinations ((Cafaro and Cerdá, 2011), (MirHassani and Jahromi, 2011), (Liao et al., 2019b)) ;

- Réseau de pipelines de type « mesh-structure » : plusieurs pipelines relient entre différentes sources et destinations ((Herrán et *al.*, 2010), (Cafaro and Cerdá, 2012), (Liao et *al.*, 2019c)) ;

1.3.2.1 Pipeline linéaire de type « one-to-one »

Le système étudié dans les problèmes d'ordonnancement de pipelines multiproduits de type « one-to-one » (voir Figure 1.4) comprend un pipeline linéaire qui transporte différents produits liquides, sous forme de lots, d'une seule source vers une seule destination, désignée par centre de distribution, située à proximité d'un marché local stratégique.

Le centre de distribution contient un parc de bacs de stockage, où chaque bac contient un produit fixé, c'est-à-dire que chaque produit est toujours stocké dans le même ensemble de bacs. Les clients sont approvisionnés avec les produits demandés depuis le centre de distribution. Le processus de déchargement consiste à décharger les produits transportés dans le pipeline vers les bacs de stockage qui leur sont spécifiés au centre de distribution, puis à les mettre à la disposition du marché local.

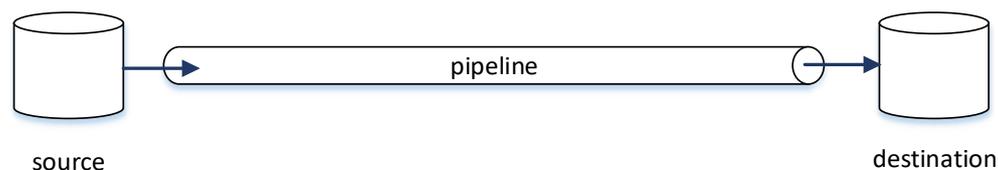


Figure 1.4 : Pipeline linéaire de type « one-to-one »

Comme il n'y a qu'une seule source, les lots de produits sont chargés de manière chronologique les uns après les autres. Durant une phase de chargement, un petit volume du lot entrant est mélangé avec le lot précédent, ce qui donne un mélange appelé « interface » (MirHassani and BeheshtiAsl., 2013). Par conséquent, la séquence des produits chargée dans le pipeline pourrait créer une contamination entre les lots. Cet aspect est traité dans certains travaux de recherche (i.e. (Relvas et *al.*, 2006), (Cafaro and Cerdá, 2008), (MirHassani and BeheshtiAsl., 2013)).

Les principales décisions d'ordonnancement de pipelines linéaires de type « one-to-one » concernent la séquence des lots de produits à expédier dans le pipeline, la taille des lots, le temps de chargement et de déchargement des lots et l'affectation de chaque lot à un groupe de bacs de stockage au niveau du centre de distribution. Par conséquent, le problème ne repose pas uniquement sur l'ordonnancement des lots, mais inclut également la gestion des stocks au centre de distribution. Par ailleurs, l'ordonnancement des lots fournis doit satisfaire la demande des clients sur un horizon de planification spécifique.

Il est à noter qu'un état de l'art sur les travaux de recherche traitant du problème d'ordonnement des pipelines linéaires de type « one-to-one » est présenté et détaillé au chapitre 2.

1.3.2.2 Pipeline linéaire de type « one-to-many »

Les problèmes d'ordonnement des pipelines multiproduits de type « one-to-many » considèrent un système qui se compose typiquement d'une source, d'un pipeline linéaire et de plusieurs destinations (centres de distribution) qui sont reliés aux marchés de consommation locaux (voir Figure 1.5). Un produit peut être demandé par plusieurs destinations, et les quantités de produits fabriquées dans la source doivent être chargées sous forme de lots. Un lot transporté dans le pipeline peut être déchargé complètement au niveau d'une destination (Rejowski and Pinto, 2003), ou réparti sur plusieurs destinations ((Cafaro and Cerdá, 2004), (Cafaro et al., 2011), (Zaghian and Mostafaei, 2016)).

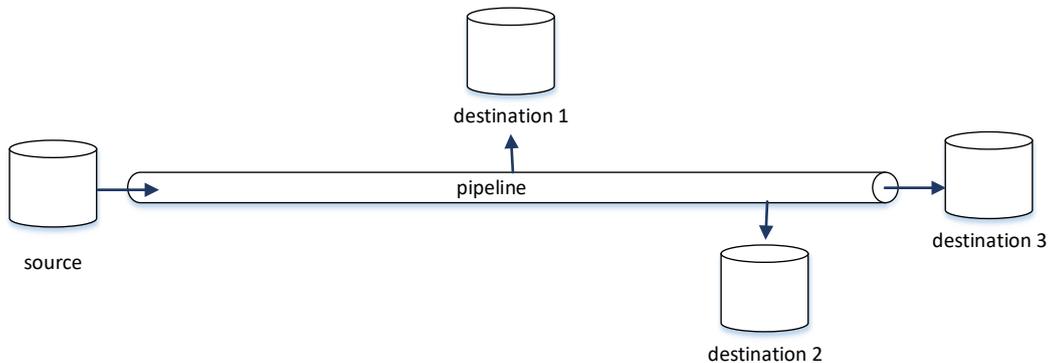


Figure 1.5 : Exemple d'un pipeline linéaire de type « one-to-many »

L'élément de distribution résulte à la fois du transfert des produits en lots dans le pipeline et du transfert vers les marchés locaux. Les principaux obstacles rencontrés dans ces opérations concernent la satisfaction des demandes de produits par les différents marchés de consommation et leur grande variation dans un horizon temporel restreint.

Par ailleurs, les lots de produits transportés dans le pipeline doivent être stockés dans les bacs de stockage qui leur sont dédiés aux centres de distribution. Les décisions qui sont typiquement impliquées dans la source sont le choix du produit à envoyer au pipeline, sa quantité, sa date de chargement, ainsi que sa destination ou sa répartition entre les différents centres de distribution.

1.3.2.3 Pipeline linéaire de type « many-to-many »

Concernant les structures de pipelines linéaires de type (many-to-many), plusieurs sources situées sur des sites différents utilisent le même pipeline principal pour expédier des lots de produits distincts vers des centres de distribution en aval, à proximité de grands marchés de

consommation (voir Figure 1.6). En d'autres termes, les pipelines à sources multiples impliquent des sources qui peuvent être localisées sur des sites autres que l'origine du pipeline. Elles fabriquent les produits demandés, avant de les expédier, sous forme de lots, le long du pipeline vers les différents centres de distribution connectés à celui-ci.

La différence majeure par rapport aux structures de pipelines linéaires à source unique est la nécessité de spécifier la source où le prochain pompage sera effectué. Une autre caractéristique importante des pipelines linéaires à sources multiples est la possibilité d'injecter un nouveau lot à partir d'une source non originaire. Par conséquent, les lots qui sont chargés le long du pipeline ne seront plus positionnés de manière chronologique.

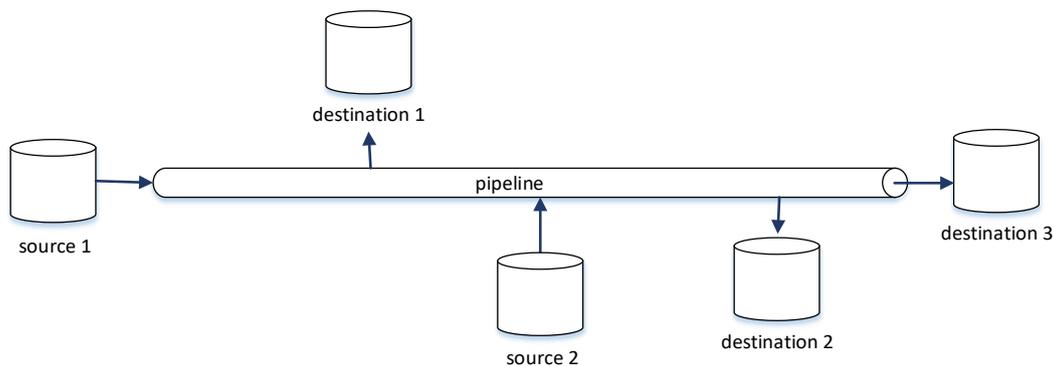


Figure 1.6 : Exemple d'un pipeline linéaire de type « many-to-many »

Dans les systèmes comportant des pipelines linéaires à source unique, les lots sont séquencés dans le pipeline dans le même ordre qu'ils sont injectés. Si la séquence chronologique des lots est respectée, le lot $(i + 1)$ non seulement circule dans le pipeline juste après le lot i , mais il a également été chargé juste après l'injection du lot i à l'origine du pipeline.

En ce qui concerne les pipelines à sources multiples, la situation se présente différemment. En effet, un lot n'est pas nécessairement précédé de ceux précédemment chargés dans le pipeline. Un lot $(i + 1)$ circulant immédiatement après le lot i n'est pas obligatoirement inséré dans le pipeline juste après le chargement du lot i . En d'autres termes, le lot $(i + 1)$ injecté à l'origine peut être précédé par le lot i chargé dans le pipeline à partir d'une autre source située en aval, même si le lot $(i + 1)$ a été inséré plus tôt. Comme les lots et les opérations de pompage ne sont pas toujours séquencés de manière similaire, ils doivent être traités comme des entités indépendantes dans la formulation du problème d'ordonnancement des pipelines à sources multiples (Cafaro and Cerdá, 2009). La séquence chronologique des lots, une hypothèse commune des problèmes d'ordonnancement de pipelines linéaires à source unique, ne peut plus être utilisée. Ceci complique sûrement le repérage et le contrôle des interfaces de contact entre les lots, car le suivi de la séquence des lots de produits peut être encore plus difficile.

Une autre caractéristique intéressante des pipelines linéaires à sources multiples est le fait que plusieurs opérations de pompage peuvent être effectuées simultanément au niveau de différentes sources. De plus, lorsqu'un nouveau lot est inséré à l'entrée du pipeline, un ou plusieurs lots ayant une somme de volumes similaire sont poussés dans les bacs de stockage correspondants au niveau d'un ou plusieurs centres de distribution (Cafaro and Cerdá, 2010).

1.3.2.4 Réseau de pipelines de type « tree-structure »

Les problèmes d'ordonnement de réseau de pipelines de type « tree-structure » se distinguent par un système de pipelines à structure arborescente. Il se compose d'un pipeline principal et d'un ensemble de pipelines secondaires (voir Figure 1.7). D'après (Cafaro and Cerdá, 2011), nous pouvons distinguer entre deux catégories de réseaux de pipelines à structure arborescente : à un seul niveau et à plusieurs niveaux.

Dans un réseau de pipeline de type « tree-structure » à un seul niveau, tous les pipelines secondaires émergent du pipeline principal. Les lots de produits injectés à l'origine du pipeline principal peuvent être livrés à un ensemble de centres de distribution connectés directement au pipeline principal, ou raccordé par les pipelines secondaires. Chacun de ces derniers possède son propre point de branchement le long du pipeline principal. À ce nœud, les lots de produits peuvent être directement déchargés vers les centres de distribution, ou transférés du pipeline principal vers les pipelines secondaires sans avoir besoin de bacs de stockage intermédiaires.

Les réseaux de pipelines de type « tree-structure » à plusieurs niveaux contiennent des sources, des centres de distributions et des stations à double usage. Un tel système est composé d'un pipeline principal et de plusieurs pipelines secondaires émergeant à des points de branchement à différents niveaux. Les sources sont directement connectées au pipeline principal et y injectent les produits sous forme de lots ; tandis que les centres de distribution reçoivent les lots de produits, soit directement du pipeline principal, soit via les pipelines secondaires. Les stations à double usage, qui disposent à la fois d'installations d'entrée et de sortie, peuvent charger et recevoir les lots du pipeline de manière simultanée.

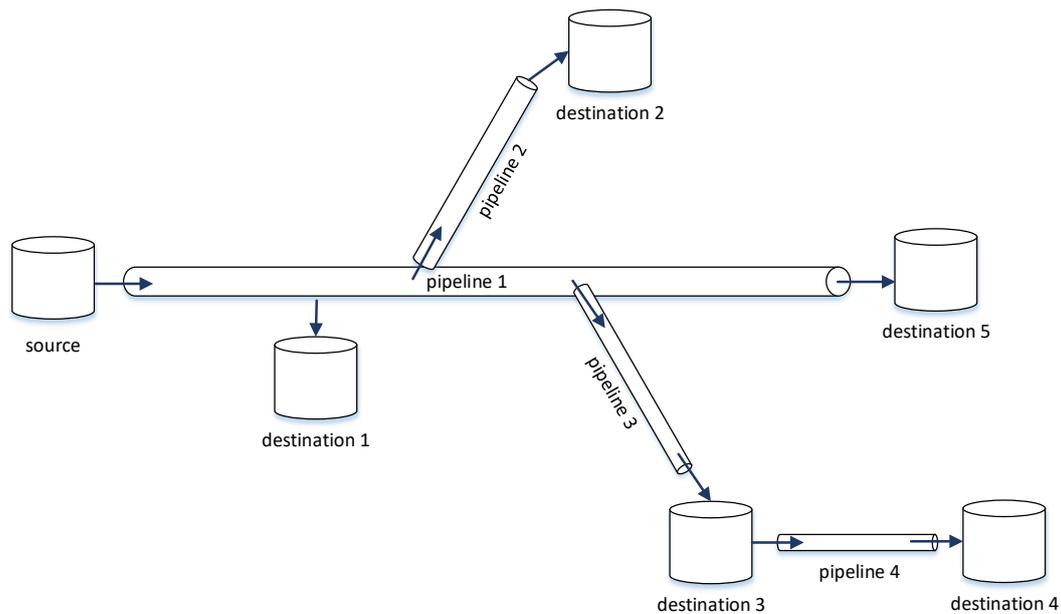


Figure 1.7 : Exemple d'un réseau de pipelines de type « tree-structure »

Le contrôle du séquençement des lots et la création de nouvelles interfaces dans les pipelines secondaires pendant le transfert des lots depuis le pipeline principal est l'un des défis rencontrés dans les problèmes d'ordonnancement des réseaux de pipelines à structure arborescente (Cafaro and Cerdá, 2011). En effet, les lots de produits dans les pipelines secondaires ne seront plus séquençés dans le même ordre qu'ils sont chargés. Ceci est dû au fait que les différentes sources, situées le long du pipeline principal, peuvent injecter de nouveaux lots de produits entre deux lots déjà présents dans le pipeline ou augmenter le volume des lots de produits existants.

1.3.2.5 Réseau de pipelines de type « mesh-structure »

Les problèmes d'ordonnancement de réseau de pipelines de type « mesh-structure » se caractérisent par un système qui peut être considéré comme un ensemble de pipelines interconnectés avec plusieurs stations d'entrée (sources) et de sortie (destinations) (voir Figure 1.8). Les opérations de ces différentes peuvent être programmées en même temps de manière intégrée (Cafaro and Cerdá, 2012). Chaque pipeline individuel possède une source unique à son origine et un ou plusieurs centres de distribution. Les lots de différents produits injectés aux sources passent généralement par plusieurs pipelines avant d'atteindre leur destination finale.

Une caractéristique intéressante des réseaux de pipelines de type « mesh-structure » concerne les opérations de chargement sont effectuées de façon simultanée au niveau de plusieurs sources. En même temps, des livraisons de produits provenant de lots déchargés au niveau des différents centres de distribution peuvent également avoir lieu.

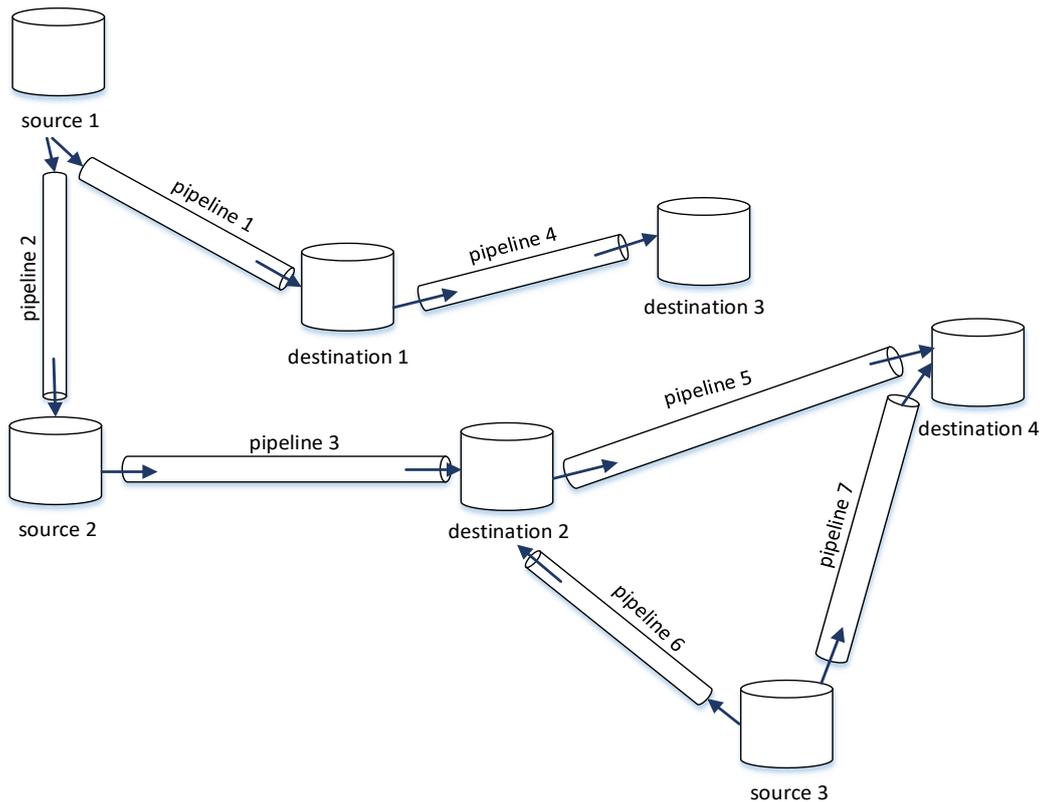


Figure 1.8 : Exemple d'un réseau de pipelines de type « mesh-structure »

Par ailleurs, la complexité d'ordonnement d'un réseau de pipelines de type « mesh-structure » est liée au fait qu'une source peut être directement reliée à plusieurs centres de distribution par différents pipelines ou vice versa. En outre, deux ou plusieurs séquençements de pipelines peuvent relier une source à un centre de distribution éloigné, et la direction du flux dans certains pipelines peut être inversée. En d'autres termes, il peut y avoir plusieurs chemins alternatifs pour déplacer un lot d'une source particulière à la destination assignée.

Par conséquent, le choix d'un itinéraire approprié pour chaque lot est également une décision à prendre pour éviter la saturation de certains pipelines et garantir la satisfaction de la demande. Compte tenu des aspects structurels et opérationnels à prendre en compte, il est clair que l'ordonnement des réseaux de pipelines de type « mesh-structure » reste un problème très difficile à résoudre (Cafaro and Cerdá, 2012).

Notons qu'un état de l'art regroupant les travaux de recherche sur les problèmes d'ordonnement des réseaux de pipelines de type « tree-structure » et de type « mesh-structure », ainsi que sur les approches de résolution est présenté au chapitre 4.

1.3.3 Les problèmes d'ordonnancement au cœur de la thèse

Actuellement, le réseau de pipelines OCP est utilisé pour répondre principalement aux besoins des clients internes au complexe chimique de Jorf. La demande du produit local K09L a représentée, en 2021, un peu plus de 95% de la demande totale à satisfaire par pipeline, contre 5% environ pour la demande des produits externes destinés au port de Jorf pour la même année. De ce fait, selon les besoins communiqués sur un horizon temporel fixé, ne dépassant pas une semaine, les décisions portant sur l'ordonnancement du réseau de pipeline diffèrent selon deux cas possibles :

- **Cas de deux demandes** : dans ce cas, la demande sur un horizon de planification spécifié concerne le produit local K09L et un produit externe. Les deux produits sont fabriqués en regroupant les lignes de production en deux ensembles au niveau des laveries, où chaque ensemble a dédié à la fabrication d'un produit. Par la suite, les produits sont envoyés dans le pipeline principal en lots séparés par des volumes d'eau (voir Figure 1.9). Puis, le groupe local et le groupe export 1 de la station terminale sont dédiés au stockage des lots du produit local K09L, avant d'acheminer les lots stockés aux clients internes ; tandis que le groupe export 2 est spécifique au stockage du produit externe, avant de le livrer au client externe.
- **Cas de plusieurs demandes** : dans ce cas, les demandes à satisfaire sur un horizon temporel fixé portent sur le produit local K09L et deux produits externes au moins. Pour fabriquer les produits demandés par les clients, internes et externes, les lignes de production des laveries opèrent en groupes prédéfinis, selon leur disponibilité. Chaque groupe est destiné pour la fabrication d'un produit fini, sur une période bien déterminée. Chaque produit obtenu est acheminé dans le pipeline principal sous forme de lots séparés par des quantités d'eau, pour éviter leur contamination. Une fois arrivés à la station terminale, les lots du produit local sont déchargés dans les bacs du groupe local, et les lots de produits externes sont déchargés dans les bacs des groupes d'export. Cependant, vu la forte demande du produit local, le groupe export 1 est également dédié à la réception du produit local. Comme le montre la Figure 1.10, un pipeline secondaire, désigné par pipeline de transfert, transporte le produit local depuis le groupe export 1 jusqu'au groupe local, puisque c'est à partir de ce dernier que les clients internes peuvent soutirer le produit local stocké. Par ailleurs, comme le groupe export 2 peut accueillir plusieurs produits externes durant l'horizon temporel défini, il est nécessaire d'effectuer une opération de rinçage de ses bacs, afin d'éviter la contamination des produits stockés.

A la lumière de l'analyse de la littérature par rapport à la classification des problèmes d'ordonnancement des pipelines selon leur structures, le problème d'ordonnancement du réseau

de pipeline OCP peut être traité en considérant les deux configurations décrites ci-dessus, comme suit :

- Dans le cas de deux demandes, le problème d'ordonnancement du système schématisé dans la Figure 1.9 (depuis la station de tête jusqu'aux clients internes) est considéré comme un cas particulier du problème d'ordonnancement d'un pipeline linéaire multiproduits de type « one-to-one », contenant une seule source (station de tête) et une seule destination (station terminale) reliées par un pipeline linéaire (pipeline principal). Puisqu'au meilleur de nos connaissances, les travaux de recherche analysés portent sur l'ordonnancement de produits pétroliers, alors l'étude du problème d'ordonnancement du pipeline de type « one-to-one » a été réalisée dans le domaine pétrolier, en proposant deux méthodes de résolution : une méthode exacte qui est présentée au chapitre 2 et une méthode approchée qui est proposée au chapitre 3.
- Dans le cas de plusieurs demandes, le problème d'ordonnancement du système illustré dans la Figure 1.10 (depuis la station de tête jusqu'aux clients internes et externes) est similaire au problème d'ordonnancement d'un réseau de pipelines de type « tree-structure ». Il comporte une seule source (station de tête) et plusieurs destinations (station terminale, clients internes, clients externes) qui sont liées à la source par un ensemble de pipelines (pipeline principal et pipelines secondaires). La prise en compte du pipeline secondaire reliant le groupe local et le groupe export 1, du caractère polyvalent des bacs du groupe export 2 ainsi que de l'opération de rinçage de ces bacs rend l'ordonnancement du réseau de pipelines OCP difficile. Dans le but d'étudier le problème d'ordonnancement du réseau de pipelines de type « tree-structure » pour le cas de l'OCP, une méthode exacte a été développée. Elle est présentée au chapitre 4.

Dans le but de pouvoir fournir un ordonnancement des lots de produits en vue de répondre aux demandes des clients sur un horizon de planification bien défini, en considérant les contraintes techniques du système, les méthodes proposées prennent en considération les éléments suivants :

- La séparation des lots chargés dans les pipelines ;
- Le respect de la capacité des bacs de stockage (bacs dédiés et bacs polyvalents) ;
- Les opérations de remplissage et de soutirage des bacs de stockages ;
- L'opération de rinçage des bacs polyvalents.

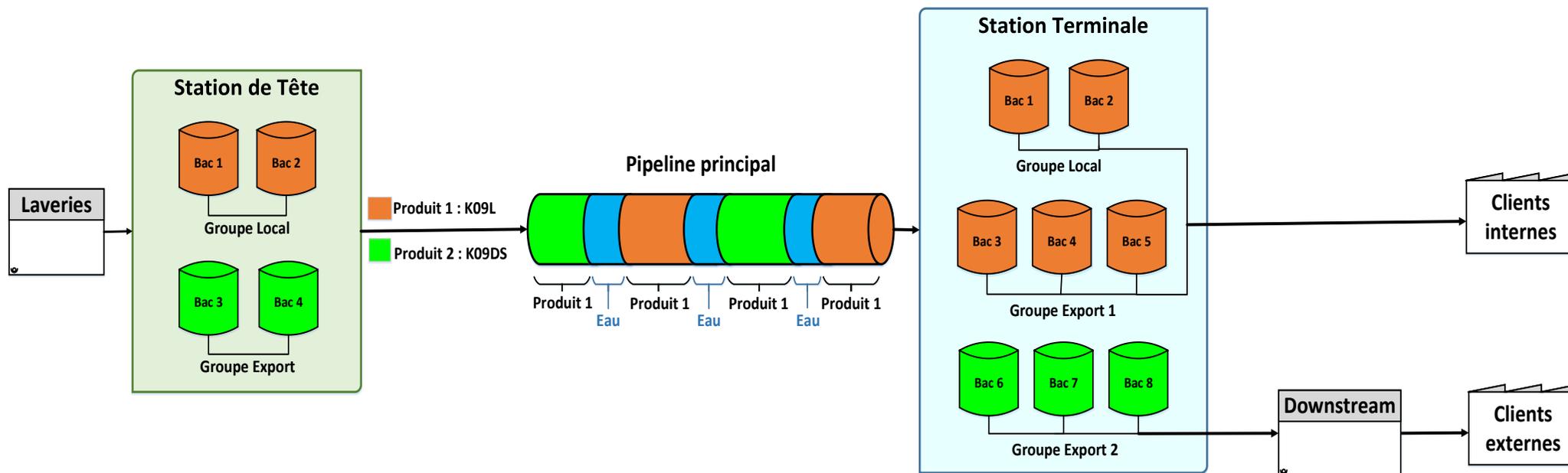


Figure 1.9 : Modélisation du réseau de pipelines OCP dans le cas de deux demandes

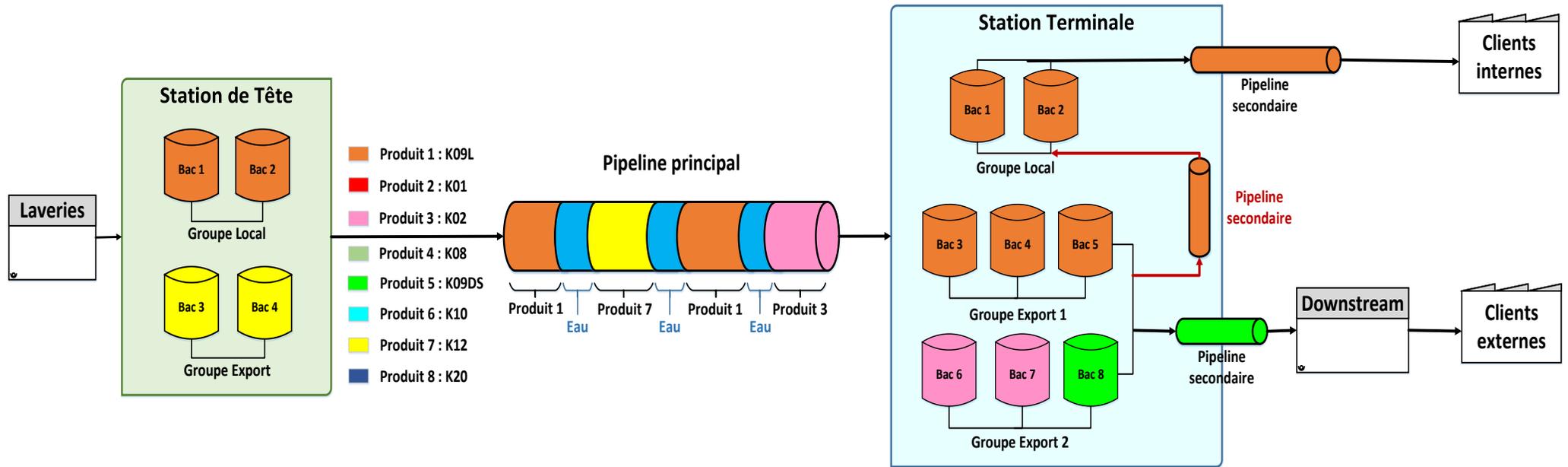


Figure 1.10 : Modélisation du réseau de pipelines OCP dans le cas de multi demandes

1.4 Méthodes de résolution

A partir de l'analyse de la littérature portant sur les problèmes d'ordonnement des pipelines, les méthodes de résolution existantes peuvent être divisées principalement en deux catégories : méthodes de résolution exactes et méthodes de résolution approchées.

1.4.1 Méthodes de résolution exactes

Une méthode de résolution exacte est une méthode qui fournit une garantie de trouver la solution optimale pour une instance de taille finie dans un temps limité tout en prouvant son optimalité (Puchinger and Raidl, 2005).

1.4.1.1 Programmation linéaire

La programmation linéaire (Dantzig, 1983) est considérée comme un outil mathématique révolutionnaire qui a permis pour la première fois en recherche opérationnelle de formuler des objectifs généraux pour des problèmes de décision complexes. Dantzig propose en 1947 la puissante méthode du simplexe pour résoudre ce type de programme. Plus tard en 1984, Karmarkar développe l'algorithme des points intérieurs comme autre méthode de résolution. Le modèle théorique basique de la programmation linéaire repose sur l'optimisation d'une fonction linéaire (à minimiser ou maximiser) sous contrainte d'inégalités linéaires, dont les termes sont exprimés par le produit d'une variable et d'un scalaire réel. Parmi les classes les plus connues de programmes linéaires figurent : les programmes linéaires dits « simples », les programmes linéaires en nombres entiers et les programmes linéaires mixtes.

Dans un programme linéaire « classique », les variables du problème modélisées sont toutes continues et peuvent varier sur un intervalle donné. Bien que la méthode du simplexe n'exploite pas la structure spatiale des problèmes comme le fait la méthode des points intérieurs, celle-ci demeure très efficace pour la résolution de ce type de programme.

Un programme linéaire en nombres entiers (PLNE) est formulé exclusivement à partir de variables entières. Cette discrétisation, appelée également contrainte d'intégrité, rend plus ce genre de problèmes plus complexes et donc plus difficiles à résoudre par les simples méthodes du simplexe ou celle des points intérieurs.

Un programme linéaire mixte (Mixed Integer Linear Programming – MILP) combine à la fois des variables continues et des variables entières. Du fait de la présence de contraintes d'intégrité, la méthode de résolution d'un MILP suit généralement les mêmes étapes que celle d'un PLNE.

En effet, la résolution d'un PLNE et d'un MILP nécessite fréquemment l'application des méthodes dédiées, à savoir : des techniques de branchement (Branch-and-Bound, Branch-and-

Cut, ...) (Hane and Ratliff, 1995), des méthodes de décomposition ((Magatão *et al.*, 2015), (Beheshti and MirHassani, 2019)) et la programmation dynamique (Liao *et al.*, 2018a) ; ou encore l'utilisation de solveurs linéaires (i.e. CPLEX, Gurobi, Xpress, ...).

La programmation linéaire fait souvent preuve de limites lorsque la taille des instances à résoudre devient assez importante. Le succès de la résolution de la programmation linéaire dépend d'un certain nombre de facteurs, à savoir : *i*) la puissance des machines de calcul, *ii*) la performance du solveur linéaire considéré (Dantzig, 1990) et *iii*) les méthodes de résolution.

Plusieurs travaux de recherche proposent des MILP pour résoudre le problème d'ordonnement des pipelines ((Rejowski and Pinto, 2003), (Cafaro and Cerdá, 2004), (Relvas *et al.*, 2006), (Cafaro and Cerdá, 2010), (MirHassani and Jahromi, 2011), (Mostafaei *et al.*, 2015). Cependant, l'application de ces modèles linéaires pour résoudre des instances de grande taille présente des défis, notamment par rapport au temps de résolution qui augmente de manière exponentielle avec l'augmentation de la taille des problèmes d'ordonnement des pipelines (Liao *et al.*, 2018b).

1.4.1.2 Programmation dynamique

La programmation dynamique est considérée parmi les techniques de résolution des problèmes d'optimisation, tels que le problème du plus court chemin, le problème d'affectation de ressources, le problème du sac à dos, etc. Cette méthode a été introduite par Bellman au début des années 1950. Elle est également appliquée dans d'autres domaines notamment l'économie.

L'idée de base de la programmation dynamique est de décomposer un problème en un ensemble de sous-problèmes tels que : 1) à partir des solutions obtenues aux sous-problèmes, il est possible de déterminer une solution au problème original et 2) les sous-problèmes puissent être résolus efficacement de manière récurrente, des plus petits aux plus grands.

De ce fait, un algorithme de programmation dynamique quatre étapes principales : la résolution des sous-problèmes (de manière récursive) ; le stockage des solutions des sous-problèmes ; la conservation des solutions efficaces et la construction de la solution du problème global à partir des solutions conservées.

Un aspect important de la programmation dynamique est que la solution d'un seul sous-problème est souvent utilisée plusieurs fois pour résoudre plusieurs sous-problèmes plus importants. Ainsi, dans un algorithme de programmation dynamique, il est nécessaire de « stocker » les solutions afin d'éviter de les recalculer par la suite.

1.4.1.3 Programmation par contraintes

La programmation par contraintes (PPC) est considérée comme une méthode exacte pour résoudre les problèmes de recherche combinatoire tels que les problèmes de planification et

d'ordonnement (Rossi et *al.*, 2008). Elle s'appuie sur un large éventail de techniques issues de la recherche opérationnelle, des algorithmes, et de la théorie des graphes. La particularité de la PPC vient du fait qu'elle peut représenter le caractère non linéaire de certains problèmes par un ensemble de contraintes. Cette non-linéarité peut être sous forme de relations logiques de type condition, de produits de variables...

La programmation par contraintes s'est avérée utile dans des applications importantes de l'industrie, le commerce, la fabrication et la science. L'idée de base de la programmation par contraintes est que l'utilisateur énonce les contraintes et un solveur de contraintes à usage général est utilisé pour les résoudre. Les contraintes ne sont que des relations entre les variables, celle-ci prenant leur valeur dans un ensemble fini, et forment un problème de satisfaction de contraintes (CSP).

Les méthodes de programmation par contraintes présentent plusieurs analogies avec les méthodes de branchement et de coupe pour la programmation linéaire mixte (Bockmayr and Hooker, 2005). Toutes deux génèrent un arbre de branchement. Elles utilisent toutes les deux des méthodes d'inférence qui tirent parti de la structure du problème : plans de coupe dans le cas d'un MILP et algorithmes de propagation de contraintes dans le cas de la PPC. Une différence majeure, cependant, est que la PPC associe chaque contrainte à un algorithme qui opère sur l'espace des solutions de manière à éliminer les solutions infaisables.

Si la propagation de contraintes ne permet pas à elle seule d'obtenir une solution, une exploration est réalisée en ajoutant les contraintes de manière dynamique et en générant un arbre de recherche, afin de réduire davantage le domaine des variables définissant le problème. A chaque nœud de l'arbre construit, une variable est sélectionnée puis fixée à une des valeurs possibles de son domaine. Une solution est obtenue lorsque le domaine de chaque variable ne possède qu'une seule valeur ; si le domaine d'une variable devient vide, alors il n'y a de solution possible. Par ailleurs, l'ajout d'informations sur la nature du problème lors de la sélection des variables et des valeurs peut aider à guider la recherche de solutions réalisables.

1.4.2 Méthodes de résolution approchées

Une méthode approchée vise à trouver un optimum local de qualité à un problème d'optimisation difficile dans un délai raisonnable. Dans ce cas, l'optimalité globale de la solution trouvée n'est pas garantie. Les méthodes approchées sont généralement des algorithmes itératifs, qui progressent vers un optimum local utilisant des techniques algorithmiques d'exploration de l'espace de solutions d'un problème. Il existe un grand nombre de heuristiques et de métaheuristiques différentes, allant de la méthode gloutonne à des algorithmes complexes reliés à l'intelligence artificielle.

1.4.2.1 Heuristiques

Il existe de nombreuses définitions possibles. D'après (Foulds, 1983), par exemple, le terme heuristique désigne une méthode qui, sur la base de l'expérience ou du jugement, semble susceptible d'apporter une solution raisonnable à un problème, mais dont on ne peut garantir la production de la solution mathématiquement optimale. Il existe au moins trois circonstances, dont une ou plusieurs peuvent conduire au recours aux heuristiques, à savoir : *i*) une explosion combinatoire des combinaisons possibles des variables de décision qui pourraient être optimales, *ii*) la difficulté d'évaluer la fonction objective (ou l'existence de contraintes probabilistes) en raison de la présence de variables stochastiques, et *iii*) des conditions qui changent avec le temps, et qui nécessitent donc une série temporelle entière de solutions, plutôt qu'une solution unique à un moment donné.

D'après (Foulds and Partovi, 1998), les méthodes heuristiques peuvent être classées selon deux catégories, à savoir : méthodes de construction et méthodes d'amélioration locale, ces dernières étant également désignées par méthodes de recherche locale.

Les méthodes constructives, comme leur nom l'indique, utilisent les données du problème pour construire une solution, étape par étape. L'avantage principal des heuristiques de construction est qu'elles permettent de construire une solution rapidement. De plus, ce type d'heuristiques s'avère être facilement programmé, et il n'est pas nécessaire d'avoir des connaissances approfondies sur le problème à traiter. Généralement, le choix effectué à une étape de l'heuristique de construction ne plus être remis en cause aux étapes suivantes. De ce fait, à la fin de la procédure, la solution obtenue pourrait être de faible qualité. Certaines heuristiques de construction sont proposées pour résoudre le problème d'ordonnement des pipelines ((MirHassani and BeheshtiAsl, 2013), (Kirschstein, 2018) ou des sous-problèmes du problème global (Relvas et *al.*, 2009).

Contrairement aux heuristiques de construction, les méthodes d'amélioration locale partent d'une solution réalisable d'un problème, généralement obtenue par une heuristique de construction. En appliquant des transformations élémentaires, les solutions au voisinage de la solution courante sont évaluées. Si l'une de ces solutions s'avère meilleure, celle-ci devient la solution courante et son voisinage est investigué ; et ainsi de suite jusqu'à ce qu'aucune amélioration ne puisse être apportée à la solution courante ou que le critère d'arrêt soit atteint. La solution retenue est alors considérée comme un optimum local.

De ce fait, en appliquant les méthodes de recherche locale, il est possible d'améliorer une solution fournie par une heuristique de construction de manière significative. Néanmoins, les solutions obtenues par les méthodes de recherche locale sont des minima locaux, qui peuvent être très éloignés de la solution optimale. C'est pourquoi, d'autres méthodes ont été développées afin de pouvoir s'extraire des minima locaux. Ces méthodes sont généralement appelées métaheuristiques, et sont décrites ci-dessous.

1.4.2.2 Métaheuristiques

Selon (Osman and Kelly, 1996), une métaheuristique est un processus itératif qui guide et modifie les opérations des heuristiques subordonnées pour produire efficacement des solutions de qualité. Elle peut combiner différents concepts pour explorer l'espace de recherche en utilisant des stratégies d'apprentissage adaptatives et des informations structurées. Les métaheuristiques se soucient particulièrement d'éviter de se faire piéger à un optimum local (pour les problèmes qui ont plusieurs optima locaux) et/ou de réduire judicieusement l'espace de recherche.

Les métaheuristiques peuvent être classifiées en deux catégories principales (Boussaïd et al., 2013) : les métaheuristiques basées sur une seule solution et celles basées sur une population. Le nombre de solutions à embarquer dans la recherche détermine si la métaheuristique est un algorithme à solution unique (trajectoire) ou à population. Habituellement, les algorithmes basés sur une seule solution sont plus orientés vers l'exploitation, tandis que les métaheuristiques basées sur une population sont plus exploratoires par nature.

Les méthodes de trajectoire utilisent une solution à la fois et commencent avec une seule solution initiale. Au cours des itérations, ces algorithmes créent une trajectoire dans l'espace de recherche. Parmi ces algorithmes se trouvent la recherche taboue (Tabu Search), le GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), ou encore la recherche locale itérative (Iterated Local Search).

Pour un algorithme basé sur une population, une population de solutions multiples est générée initialement. Ensuite, à chaque itération, un ensemble de solutions est manipulé afin de trouver des solutions vers de meilleures zones de recherche (Blum and Roli, 2003). Parmi les algorithmes basés sur populaires figurent les algorithmes génétiques (Genetic Algorithm), les algorithmes de type colonie de fourmis (Ant Colony) et les algorithmes de type Path Relinking.

Vu qu'il existe un grand nombre de métaheuristiques, il est difficile de les présenter toutes. Cependant, les sous-sections ci-dessous décrivent quelques exemples de métaheuristiques, utilisées notamment pour traiter les problèmes d'ordonnancement des pipelines ((de la Cruz et al., 2005), (Garcia-Sanchez et al., 2008), (Arruda et al., 2010)).

1.4.2.2.1 Recherche taboue

Présentée par (Glover, 1986), la recherche taboue (Tabu Search) est une métaheuristique employant des méthodes de recherche locale utilisées pour résoudre les problèmes d'optimisation.

Les méthodes de recherches locales prennent une solution potentielle à un problème et vérifient ses voisins immédiats, dans l'espoir de trouver une solution améliorée. Les méthodes

de recherche locale ont tendance à rester bloquées dans des régions sous-optimales ou sur des espaces où de nombreuses solutions sont de qualité égale.

La recherche taboue, quant à elle, améliore les performances de la recherche locale en relaxant sa règle de base. Tout d'abord, à chaque étape, les mouvements conduisant à des solutions de faible qualité peuvent être acceptés si aucun mouvement d'amélioration n'est disponible, notamment lorsque la recherche est bloquée à un minimum local. De plus, des interdictions, appelées tabous, sont introduites pour décourager la recherche de revenir à des solutions déjà visitées.

En d'autres termes, la recherche taboue opère initialement de façon à se diriger directement vers un optimum local. L'optimalité locale n'est cependant pas une condition qui conduit à l'interruption du processus de recherche, puisque la capacité d'identifier le meilleur déplacement disponible demeure. Pour éviter de retracer un chemin précédemment emprunté, la procédure enregistre des informations sur les déplacements récemment effectués, en utilisant une ou plusieurs listes dites « listes taboues », dont la taille est un paramètre à fixer. La fonction de ces listes n'est pas d'empêcher la répétition d'un mouvement, mais d'empêcher son utilisation au sens inverse. Les listes tabou sont gérées en enregistrant les mouvements dans l'ordre dans lequel ils sont effectués (listes FIFO) : chaque fois qu'une nouvelle position est ajoutée à la « fin » d'une liste, la position la plus ancienne de la liste est retirée de son « début ».

1.4.2.2.2 GRASP

La méthode GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), introduite par (Feo and Resende, 1989, 1995), est un processus itératif permettant de produire des solutions de bonne qualité pour des problèmes d'optimisation combinatoire difficiles. Chaque itération GRASP est généralement constituée de deux phases : une phase de construction, où une solution réalisable est construite de manière gloutonne, aléatoire et adaptative ; et d'une phase de recherche locale qui part de la solution construite et applique une amélioration itérative jusqu'à ce qu'une solution localement optimale soit trouvée.

Dans la phase de construction du GRASP, une solution complète est construite de manière itérative dans la phase de construction, un élément à la fois. Le critère d'arrêt peut être entre autres, le nombre maximum d'itérations, le nombre maximum d'itérations sans amélioration de la solution en place, la durée maximale d'exécution ou encore la qualité de la solution au moins aussi bonne qu'une valeur cible donnée. À chaque itération de construction, le choix de l'élément suivant à ajouter est déterminé en rangeant tous les éléments candidats (ceux qui peuvent être ajoutés à la solution) dans une liste de candidats par rapport à une fonction gourmande. Cette fonction mesure le bénéfice de sélectionner chaque élément. L'heuristique est dite adaptative parce que les bénéfices relatifs à chaque élément sont mis à jour à chaque itération de la phase de construction afin de refléter les changements apportés par la sélection

de l'élément précédent. La composante probabiliste d'un GRASP est caractérisée par le choix aléatoire d'un des bons candidats de la liste, mais pas nécessairement le meilleur candidat.

Chaque fois qu'une solution est construite, une méthode de recherche locale est appliquée pour tenter de l'améliorer. Cet algorithme de recherche locale remplace au fur et à mesure la solution actuelle par une meilleure solution dans le voisinage de la solution actuelle, jusqu'à ce qu'une solution localement optimale soit trouvée.

1.4.2.2.3 Algorithmes génétiques

Un algorithme génétique est une métaheuristique inspirée par le processus de sélection naturelle (Holland, 1975), qui appartient à la grande classe des algorithmes évolutionnaires. Les algorithmes génétiques sont couramment utilisés pour générer des solutions de qualité à des problèmes d'optimisation combinatoire, en s'appuyant sur des opérateurs à caractère biologique tels que la sélection, la mutation le croisement.

Dans un algorithme génétique, une population de solutions candidates, désignées en général par individus, à un problème d'optimisation évolue vers de meilleures solutions. Chaque solution candidate possède un ensemble de propriétés, appelés chromosomes, qui peuvent être mutées et modifiées.

L'évolution part généralement d'une population d'individus générés de façon aléatoire, et est un processus itératif, où la population de chaque itération est appelée une génération. A chaque génération, la qualité de chaque individu de la population est évaluée par une fonction désignée par fonction fitness. Celle-ci correspond à la valeur de la fonction objective du problème d'optimisation à résoudre. Tout d'abord, les individus de qualité sont sélectionnés de manière aléatoire dans la population actuelle. Ensuite, les propriétés de chaque individu sont modifiés, en appliquant les opérateurs de mutation et de croisement, pour former une nouvelle génération. La nouvelle génération de solutions candidates est par la suite utilisée dans l'itération suivante de l'algorithme. Ce processus est réitéré plusieurs fois, et se termine lorsqu'un nombre maximum de générations a été produit ou lorsqu'un niveau de « fitness » satisfaisant a été atteint pour la population.

Les algorithmes génétiques présentent néanmoins certaines limites, principalement en relation avec le temps de calcul, dû aux nombreux calculs à effectuer, notamment avec l'utilisation répétée de la fonction « fitness ». De plus, certains paramètres s'avèrent difficile à déterminer au début, particulièrement la taille de la population initiale et le paramètre de mutation.

1.5 Conclusion

Ce chapitre présente le contexte industriel et les problèmes abordés dans la thèse : en considérant le réseau de pipeline OCP, une modélisation des différents processus du système logistique est menée pour mieux appréhender son fonctionnement. Deux configurations sont proposées, selon les demandes à satisfaire, afin de pouvoir fournir une bonne aide à la prise de décision dans différentes circonstances. Une étude de la littérature portant sur les problèmes d'ordonnancement de pipelines a été réalisée. Elle nous permet de positionner les problèmes industriels par rapport aux travaux de recherche existants. En conséquence, chaque configuration considérée est ramenée à un problème d'ordonnancement de pipeline :

- Le problème d'ordonnancement des pipelines linéaires multiproduits de type « one-to-one » est considéré lorsque le réseau de pipeline OCP opère selon le cas de deux demandes au plus à satisfaire ;
- Le problème d'ordonnancement de réseau de pipelines de type « tree-structure » est concerné quand le réseau de pipeline OCP fonctionne selon le cas de plusieurs demandes.

De ce fait, l'objectif de cette thèse est de mettre à disposition des responsables de planification un ensemble de méthodes et d'outils d'aide à la décision, qui leur permet de réaliser l'ordonnancement du réseau de pipeline OCP, et leur fournit des solutions selon les paramètres qu'ils souhaitent modifier. Cet ensemble comprend ce qui suit :

- Une méthode exacte pour étudier le problème d'ordonnancement des pipelines linéaires multiproduits de type « one-to-one », qui permet de fournir une solution optimale pour les instances de petite taille, et des solutions pour les instances de grande taille en un temps raisonnable. Ce modèle mathématique est présenté au chapitre 2 ;
- Une méthode approchée pour traiter le même problème du chapitre 2, qui fournit des solutions très proches de l'optimalité pour l'ensemble des instances considérées, en un temps de calcul plus réduit. Cette méthode est décrite au chapitre 3 ;
- Une méthode exacte pour l'étude du problème d'ordonnancement de réseau de pipelines de type « tree-structure », qui permet d'obtenir la solution optimale pour l'ordonnancement à court terme en un temps très rapide, et des solutions pour l'ordonnancement sur le niveau tactique. Cette méthode est détaillée au chapitre 4.

Chapitre 2

Problème d'Ordonnancement de Pipelines Multiproduits de type « One-to-One » : modélisation et résolution exacte

Sommaire

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1 | Introduction..... | 39 |
| 2.2 | Définition du POPM-T1..... | 40 |
| 2.3 | Etat de l'art / Aperçu des études existantes pour le POPM-T1 | 45 |
| 2.3.1 | Méthodes exactes..... | 45 |
| 2.3.2 | Méthodes approchées..... | 49 |
| 2.3.3 | Méthodes hybrides..... | 50 |
| 2.3.4 | Conclusion par rapport aux articles étudiés | 50 |
| 2.4 | Modélisation mathématique proposée dans cette thèse | 55 |
| 2.4.1 | Introduction | 55 |
| 2.4.2 | Notations..... | 56 |
| 2.4.3 | Contraintes du modèle | 58 |
| 2.4.4 | Fonction objectif..... | 66 |
| 2.4.5 | Adaptation du modèle linéaire au cas de l'OCP | 69 |
| 2.5 | Expérimentations numériques | 70 |
| 2.5.1 | Environnements de l'expérimentation et instances utilisées..... | 70 |
| 2.5.2 | Performance du modèle linéaire sur la base des instances générées | 72 |
| 2.5.3 | Exemple d'ordonnancement du pipeline « One-to-One »..... | 74 |
| 2.5.4 | Analyse de sensibilité du modèle à par rapport au temps de résolution..... | 77 |
| 2.6 | Conclusion | 83 |

2.1 Introduction

Comme souligné dans le chapitre précédant, le problème d'ordonnancement des pipelines linéaires multiproduits de type « one-to-one » est considéré lorsque le réseau de pipelines OCP opère selon le cas de deux demandes à satisfaire. Ainsi, dans ce qui suit, nous nous intéressons au Problème d'Ordonnancement de Pipeline Multiproduit de type « one-to-one », que l'on note (POPM-T1). Le pipeline est un système de transport industriel constitué de tubes et d'accessoires sous pression, souvent organisés en réseau. Les produits transportés par pipeline sont généralement des matières fluides. Comparé à d'autres modes de transport (routier, ferroviaire, et maritime), le pipeline est le seul mode permettant de garantir le transport des différents produits en continu, sur de grandes distances (voir Figure 2.1). Cependant, la

construction d'un réseau de pipeline implique de lourds investissements, et la planification et l'ordonnement d'un système de pipeline multiproduit s'avère une opération compliquée à réaliser.

Au meilleur de nos connaissances, les travaux de recherche dans la littérature concernant les problèmes d'ordonnement des pipelines portent principalement sur le domaine pétrolier. En vue de mettre en évidence l'originalité de la modélisation proposée, nous nous sommes intéressés à l'étude du POPM-T1 dans le domaine pétrolier. Ainsi, sans perte de généralité ce chapitre porte sur la modélisation et la résolution exacte du POPM-T1 dans le contexte de l'industrie pétrolière.

Pour ce genre de problèmes d'ordonnement, nous considérons un pipeline linéaire qui relie une seule source (raffinerie) à une seule destination (centre de distribution). Ces deux sites sont géographiquement (voir Figure 2.2). L'objectif est de définir le volume et l'ordre des produits pétroliers à transporter par le pipeline sur un horizon de planification, afin de satisfaire les demandes de clients, tout en considérant les contraintes liées aux caractéristiques de produits et à la configuration du système de pipeline. Pour ce faire, nous donnons tout d'abord la définition du POPM-T1 dans la section (2.2). Par la suite, nous présentons un état de l'art du POPM-T1 dans la section (2.3). Nous discutons de différentes formulations et de critères d'optimisation des problèmes similaires étudiés dans la littérature. Nous proposons, dans la section (2.4), une formulation mathématique du problème en se basant sur l'axe du temps de déchargement. Nous avons montré qu'une adaptation du modèle proposé peut être réalisée au cas de l'OCP pour le transport des produits de phosphate, dans le contexte de l'industrie minière. Enfin, l'expérimentation numérique est présentée et argumentée dans la section (2.5).

2.2 Définition du POPM-T1

Le POPM-T1 dispose d'un pipeline linéaire unidirectionnel qui relie une raffinerie à un centre de distribution (voir Figure 2.1). La raffinerie fabrique un ensemble de P produits (numérotés de 1 à P). Les produits fabriqués peuvent être stockés à la raffinerie avant d'être envoyés au centre de distribution par le pipeline. L'acheminement des produits pétroliers à travers le pipeline est organisé sous forme de lots : un lot i contient un seul produit p et possède un volume Q_i compris entre un volume minimum $Vmin_p$ et un volume maximum $Vmax_p$.

Sur un horizon de planification fixé, de longueur h_{max} (en heures), le nombre maximum de lots est fixé à N . L'ensemble des lots planifiés doivent être injectés successivement à partir de la raffinerie. Lors de l'injection des lots, aucune séparation physique n'est utilisée entre deux lots. La caractéristique chimique de certains produits rend leurs contacts directs dangereux dans le pipeline, et entraîne leur contamination. Par conséquent, une matrice s qui définit la compatibilité des produits est introduite. L'élément $s_{p,q} = 1$ si les deux produits p et q sont

compatibles, c’est-à-dire qu’ils peuvent être injectés successivement l’un après l’autre dans le pipeline. Dans le cas contraire, l’injection successive de ces deux produits n’est pas autorisée.

Le centre de distribution dispose d’un réservoir dédié à chaque produit, chaque réservoir modélise l’ensemble des cuves affectées au stockage d’un produit. Chaque produit p a une capacité de stockage limitée à $I A_{max_p}$. Le déchargement d’un lot au centre de distribution pourrait être bloqué en cas de saturation de la capacité de stockage du produit, ce qui pourra causer un arrêt total du pipeline.

Avant d’envoyer aux clients les produits déchargés au centre de distribution, ceux-ci doivent être maintenus dans les stocks pendant une durée temporelle, désignée de temps de stabilisation, dépendant du produit p , et notée st_p , pour un contrôle de qualité. Après la durée de stabilisation, le centre de distribution pourra l’utiliser pour répondre à la demande des clients. Etant donné que chaque jour de l’horizon de planification est indexé par t ($t = 1 \dots T$), les demandes journalières sont à satisfaire à la fin de chaque journée de cet horizon.

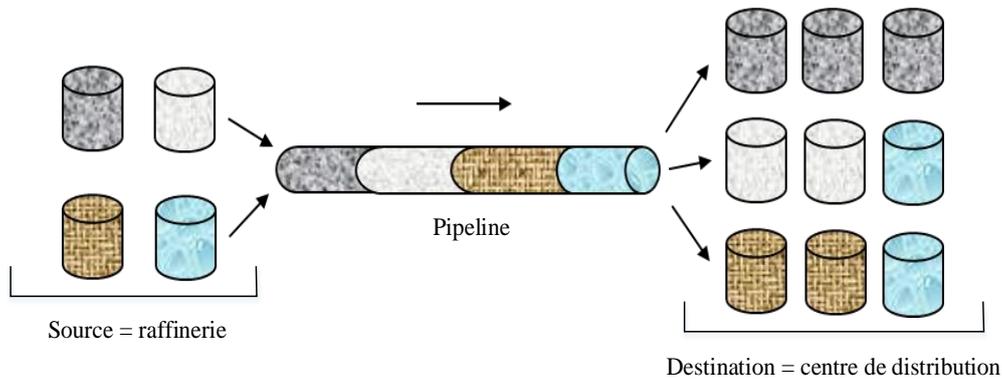


Figure 2.1 : Schéma du pipeline « One-to-One »

Le POPM-T1 peut être présenté en considérant les données d’entrée suivantes (voir Figure 2.2) :

- Les propriétés du pipeline : longueur P , diamètre D , débit de pompage vb ;
- La longueur de l’horizon de planification h_{max} (en heures) ;
- Le nombre de produits P à envoyer dans le pipeline ;
- Les spécifications de stock du produit p au centre de distribution : la capacité de stockage $I A_{max_p}$, le stock initial $I A_{0,p}$;
- Le volume minimum $Vmin_p$ et maximum $Vmax_p$ d’un lot contenant le produit p ;
- La demande du produit p au jour t : $dem_{p,t}$;
- La matrice de compatibilité des produits : s ;
- La durée de stabilisation st_p .

Il est à noter que les deux dernières données sont spécifiques aux produits pétroliers.

L’objectif est de définir l’ordre et le volume des lots à transporter par pipeline (en amont), en prenant en compte le niveau de stock des produits au centre de distribution (en aval) pour

garantir la satisfaction des demandes journalières des produits sur un horizon de planification donné, tout en maximisant le volume total transporté, et en respectant les contraintes ci-dessous :

- Le pipeline doit être plein durant tout l'horizon de planification ;
- La conservation de flux doit être respectée : le volume total chargé en amont du pipeline est égal au volume total sortant en aval ;
- Le volume d'un lot i contenant le produit p doit être compris entre $Vmin_p$ et $Vmax_p$;
- Le niveau de stock d'un produit p ne doit pas dépasser sa capacité $I Amax_p$. L'arrêt du pipeline aura lieu en cas de saturation de capacité ;
- Les deux produits p et q affectés respectivement à deux lot successifs i et $(i + 1)$ doivent être compatibles.

En vue de fournir un ordonnancement des lots, les hypothèses suivantes sont prises en compte :

- Le pipeline est opérationnel 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 ;
- Le débit de pipeline est constant durant tout l'horizon de planification ;
- Toutes les demandes journalières du produit p au jour t ($dem_{p,t}$) sont données ;
- La gestion de stock au niveau de la raffinerie n'est pas prise en compte. Par conséquent, les produits à charger dans le pipeline à la raffinerie sont considérés disponibles à tout instant ;
- Les lots sont chargés dans le pipeline sans séparation physique entre eux ;
- Le temps de stabilisation est défini en heures. Il est considéré fixe pour tous les produits ;
- La stabilisation démarre après le déchargement complet du lot.

Une solution du POPM-T1 doit fournir les éléments suivants :

- La séquence et le volume des lots à charger dans le pipeline durant l'horizon de planification ;
- Les dates de début et de fin de chargement de chaque lot à la raffinerie ;
- Les dates de début et de fin de déchargement de chaque lot au centre de distribution ;
- Les dates de début et de fin de chaque arrêt du pipeline ;
- Le stock de chaque produit p au centre de distribution à la fin de chaque jour t de l'horizon de planification.

On peut noter qu'il existe une simple relation arithmétique entre les dates de chargement des lots et les dates de déchargement des lots : la date de début/fin de déchargement d'un lot est égale à sa date de début/fin de chargement plus la durée totale de transport et des arrêts éventuels du pipeline durant l'acheminement du lot. On peut déduire les dates de début et de fin de chargement des lots à la raffinerie à partir de celles de déchargement.

Compte tenu des éléments ci-dessous, le POPM-T1 entre dans la catégorie des problèmes de la planification et l’ordonnancement des systèmes de transport par pipeline et particulièrement le pipeline linéaire de type « One-to-One ». Ainsi, une analyse de la littérature portant sur les problèmes d’ordonnancement de pipeline de type « One-to-One » est effectuée dans la section suivante avant la présentation du modèle proposé.

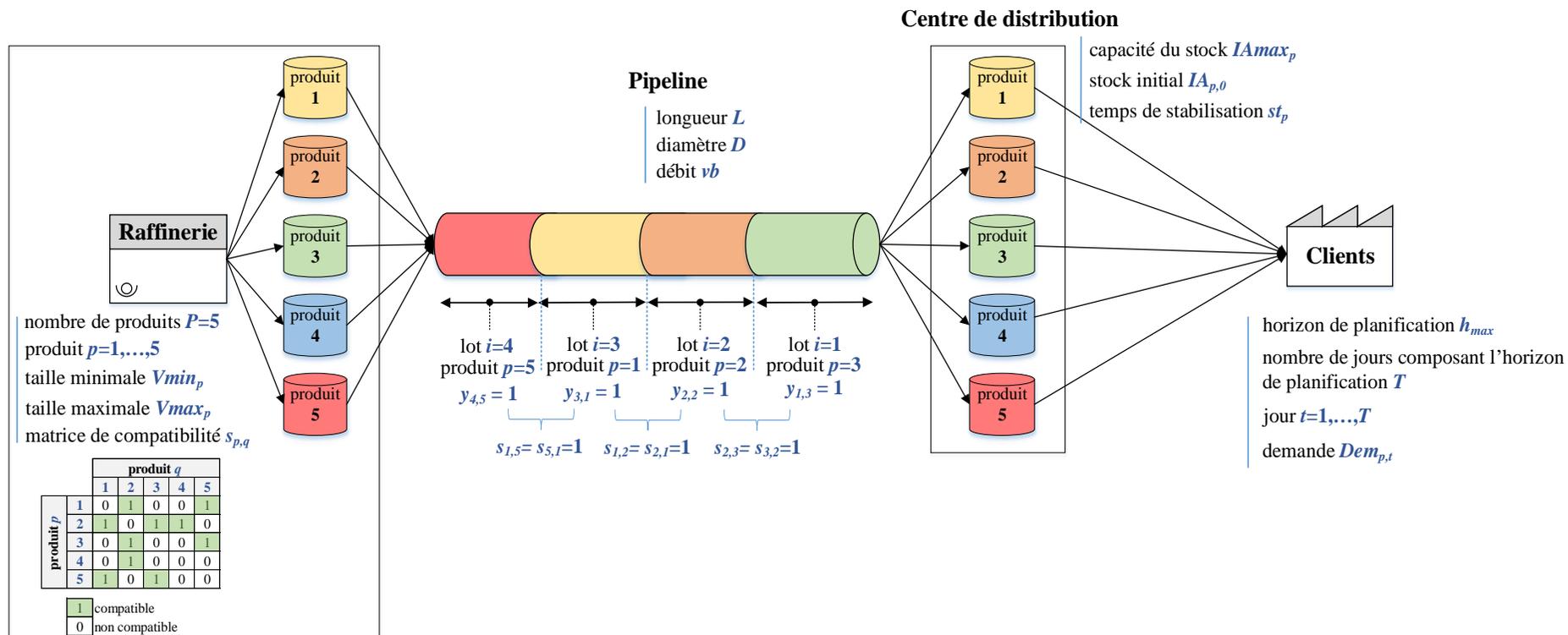


Figure 2.2 : Modélisation du POPM-T1 « One-to-One »

2.3 Etat de l'art / Aperçu des études existantes pour le POPM-T1

Il existe de nombreux travaux de recherche concernant les problèmes d'ordonnancement de pipeline en raison de ses implications économiques dans le domaine de l'industrie pétrolière. Selon (Magatão *et al.*, 2015), les problèmes d'ordonnancement de pipeline peuvent être classés en fonction de la structure du pipeline : pipeline linéaire et réseau. De plus, la classe de pipeline linéaire se divise en trois catégories selon les différentes topologies suivantes : pipeline de type « One-to-One » avec une seule source et une seule destination ; pipeline de type « One-to-Many » avec une seule source et plusieurs destinations rangées linéairement ; pipeline de type « Many-to-Many » reliant plusieurs sources aux plusieurs destinations. Dans notre cas, nous nous intéressons plus particulièrement au problème d'ordonnancement de pipeline linéaire de type « One-to-One », puisque la structure de son pipeline est similaire à celle du pipeline principal du Groupe OCP, présenté dans le premier chapitre.

Le problème d'ordonnancement de pipeline multiproduit linéaire de type « One-to-One » (POPM-T1) a attiré l'attention de plusieurs chercheurs durant les dernières décennies. La plupart des travaux portant sur le POPM-T1 proposent une méthode exacte basée sur des modèles linéaires ((Shah, 1996), (Magatão *et al.*, 2004), (Relvas *et al.*, 2006), (Relvas *et al.*, 2007), (Cafaro and Cerdá, 2008), (Magatão *et al.*, 2011), (Relvas *et al.*, 2013), (Moradi and MirHassani, 2015), (Moradi and MirHassani, 2016), (Dimas *et al.*, 2018) et (BeheshtiAsl and MirHassani, 2019)). Une minorité des travaux se focalisent sur des méthodes approchées reposant sur des heuristiques ((MirHassani and BeheshtiAsl, 2013) et (Kirschstein, 2018)), ou des méthodes hybrides pour l'étude du problème ((Relvas *et al.*, 2009) et (Bamoumen *et al.*, 2019)).

De ce fait, les travaux existants dans la littérature traitant le POPM-T1 sont présentés selon le type de méthode proposée : la section (2.3.1) porte sur les travaux qui présentent des méthodes exactes ; la section (2.3.2) s'intéresse aux articles qui se basent sur des méthodes approchées ; la section (2.3.3) présente les travaux qui considèrent des méthodes hybrides. Enfin, une conclusion est formulée à la section (2.3.4).

2.3.1 Méthodes exactes

(Shah, 1996) est considéré parmi les premiers travaux qui se focalisent sur le POPM-T1. L'auteur décompose le problème étudié en deux sous-problèmes, et propose un chaînage de deux modèles linéaires mixtes (MILP : *Mixed-Integer Linear Programming*) en discrétisant l'horizon de planification en plusieurs périodes. En effet, les résultats du premier modèle linéaire, dénommé « downstream model » sont utilisés comme données d'entrée dans le second modèle, qualifié de « upstream model ».

(Magatão *et al.*, 2004) propose un modèle linéaire mixte pour traiter une extension du POPM-T1 avec un pipeline bidirectionnel, où les produits peuvent être transportés de la

raffinerie jusqu'au port, ou du port jusqu'à la raffinerie. Le modèle linéaire proposé utilise une formulation discrète du temps et du volume des lots. Il vise à fournir un ordonnancement des produits qui satisfait la demande, que ce soit au niveau du port ou de la raffinerie. La fonction objectif minimise un ensemble de critères d'optimisation qui constituent, selon l'article, le coût total opérationnel. De plus, une procédure de résolution est présentée en vue de réduire le nombre de variables et de contraintes, et de diminuer ainsi le temps de résolution du modèle. Plusieurs instances sont utilisées pour évaluer la performance du modèle linéaire à court terme (5 jours). Ce dernier est capable de fournir les solutions optimales pour ces instances, en un temps de calcul d'environ 15 minutes. Cependant, aucun test n'est effectué pour un horizon allant à un mois et plus, vu que le problème devient plus difficile à résoudre, en raison de sa grande taille, surtout avec une représentation discrète du temps et du volume.

(Relvas *et al.*, 2006) étudie le POPM-T1 et proposent un modèle linéaire mixte qui prend en considération des contraintes liées au temps de stabilisation des produits au niveau des stocks et à la matrice de compatibilité des produits. Le modèle cherche à maximiser le temps opérationnel total du pipeline, ainsi que le stock total au centre de distribution à la fin de l'horizon temporel. Trois scénarios basés sur une étude de cas réelle ont été créés pour évaluer le modèle. Ces scénarios comportent une séquence de produits prédéfinie sur un horizon d'un mois. Le premier scénario utilise une « séquence fixe » des produits, où seul le volume des lots doit être déterminé par le modèle. Le second scénario considère une « séquence mixte » des produits. Cette dernière comporte quelques lots « libres » sans produits affectés. Le modèle linéaire doit compléter les lots « libres » et déterminer leurs volumes. Le troisième scénario est basé sur une « séquence libre » des produits, qui contient plus de lots libres que le scénario précédent. La résolution du modèle linéaire s'arrête si l'une des deux conditions suivantes est vérifiée : 1) le temps de résolution maximal de deux heures est atteint ; 2) le GAP est inférieur à 5%. Les résultats montrent que le modèle linéaire n'est pas capable de fournir la solution optimale pour le dernier scénario. C'est la raison pour laquelle ils proposent par la suite une décomposition temporelle, où l'horizon de planification est découpé en deux segments égaux avant la résolution du modèle. Par conséquent, la solution du dernier scénario donne un meilleur taux d'utilisation du pipeline que celles des deux premiers.

Par la suite, (Relvas *et al.*, 2007) propose une version robuste de leur modèle linéaire présenté dans (Relvas *et al.*, 2006). Cette nouvelle version du modèle prend en compte des contraintes relatives à la variation du temps de stabilisation des produits, au temps d'arrêt du pipeline et à la variation du débit de pompage, qui est le débit du pipeline. En outre, une procédure de résolution est introduite en considérant les 6 éléments de perturbation suivants : la variation des demandes durant l'horizon de planification, l'ajout ou la suppression des lots dans la séquence, les arrêts imprévus du pipeline, l'indisponibilité des réservoirs de stockage dû à la maintenance, l'ajustement de la taille des lots et la variation du débit de pompage. Cette procédure permet de redéfinir un ordonnancement des produits, selon la perturbation

considérée. Le modèle est évalué en considérant cinq scénarios basés sur un cas réel, avec un horizon de planification d’un mois. Le premier scénario est considéré comme scénario de base, et les quatre autres scénarios présentent chacun un ou plusieurs éléments de perturbation qui ont lieu pendant l’horizon de planification. Le modèle est exécuté sous une limitation temporelle de deux heures ou une tolérance maximale de 5%. L’expérimentation numérique montre que le modèle est capable de fournir des solutions adaptées aux changements imprévus dans les scénarios considérés.

(Cafaro and Cerdá, 2008) présente un modèle linéaire pour le POPM-T1. Le modèle proposé utilise une représentation continue du temps. Afin de réduire le temps de résolution du modèle, le volume des lots est formulé sous forme de variables discrètes avec un ensemble de valeurs prédéfinies. La fonction objectif du modèle prend en considération plusieurs critères d’optimisation liés au coût opérationnel, à savoir : la minimisation du coût lié à la possession du stock ; la maximisation du coût relatif au temps opérationnel du pipeline ; la minimisation du coût du volume contaminé entre les lots successifs ; et la minimisation de la pénalité due à la livraison des demandes avec retard. La performance du modèle est mesurée en se basant sur les trois scénarios présentés dans (Relvas *et al.*, 2006) : « séquence fixe », « séquence mixte » et « séquence libre ». Le modèle fournit des résultats ayant un taux de remplissage du pipeline plus grand par rapport à ceux de (Relvas *et al.*, 2006), et avec un temps de calcul considérablement réduit.

(Magatão *et al.*, 2011) traite l’extension du POPM-T1 avec un pipeline bidirectionnel. Les auteurs présentent 3 modèles : un modèle de la programmation par contraintes, un modèle linéaire et un modèle mixte qui combine les deux précédents. Les 3 modèles se basent sur une formulation temporelle continue. Des contraintes additionnelles sont prises en compte dans ces modèles, à savoir l’utilisation de « plug » qui signifie le volume du produit séparant deux lots consécutifs, en vue d’éviter la contamination entre les lots. Cependant, les auteurs supposent que le volume du « plug » doit être très faible pour pouvoir ignorer son temps de chargement dans le pipeline. L’objectif est de minimiser le coût lié aux « plugs », ainsi qu’à la consommation de l’électricité pendant les heures de pointe, vu qu’elle augmente le coût de pompage. Les modèles sont évalués en se basant sur des études de cas réelles avec un horizon de planification de 6 jours. Les résultats prouvent que le modèle mixte permet d’obtenir des solutions ayant des coûts réduits, en comparaison avec les deux premiers modèles.

(Relvas *et al.*, 2013) propose deux modèles linéaires mixtes pour étudier le POPM-T1. Le premier modèle est dénommé « Fixed Batch Size model » (FBS), qui utilise une formulation discrète du volume de lots avec un ensemble de valeurs prédéfinies. Le second modèle proposé est désigné par « Variable Batch Size model » (VBS) avec une formulation continue du volume de lots. Ce dernier doit être compris entre les bornes maximale et minimale. L’objectif est de garantir la satisfaction de la demande tout en minimisant l’écart entre celle-ci et le volume total des lots transportés pendant l’horizon de planification. La performance des deux modèles

linéaires est évaluée en utilisant trois instances de taille différente basées sur un cas réel. Pour les 3 instances, l'horizon de planification varie entre 7, 15 et 31 jours avec respectivement un nombre maximum de lots de 16, 35 et 71. La durée de résolution des deux modèles est limitée à deux heures. Le résultat montre que le modèle VBS fournit des solutions de meilleure qualité que celles du modèle FBS pour les deux premières instances. Dans le cas de l'instance de 31 jours, aucune solution n'est trouvée par le modèle VBS au bout de deux heures. En revanche, un prétraitement des données permet au modèle VBS de fournir une solution.

(Moradi and MirHassani, 2015) développe un modèle linéaire mixte en se basant sur celui de (Relvas *et al.*, 2013). L'idée est d'effectuer une décomposition temporelle dans le séquençage des lots. Au lieu de considérer tout l'horizon, le modèle proposé utilise un séquençage des lots par jour. Une telle décomposition permet de réduire le nombre de variables et de contraintes du modèle. Dans le dernier, la fonction objectif est composée de plusieurs critères d'optimisation économiques et opérationnels, notamment la minimisation de la variation des coûts de l'électricité pendant les heures de pointe, la maximisation du niveau de stock le plus bas à la fin de l'horizon de planification et la minimisation du coût relatif aux commandes livrées avec retard. La performance du modèle est évaluée et comparée à (Relvas *et al.*, 2013) en utilisant les instances de ce dernier. Le modèle proposé fournit des solutions qui possèdent un niveau de stock plus grand que celui obtenu par (Relvas *et al.*, 2013), avec un temps CPU réduit.

(Moradi and MirHassani, 2016) se focalise sur le POPM-T1 sous incertitude. Les auteurs proposent tout d'abord un modèle linéaire mixte tout en considérant la gestion des stocks au centre de distribution et avec une demande déterministe. Ensuite, un modèle robuste se basant sur le précédent est proposé pour traiter le cas de l'incertitude sur la demande. Dans les deux modèles, la fonction objectif minimise le coût relatif au volume contaminé entre deux lots consécutifs, ainsi que le coût de pompage. Une analyse de la robustesse du second modèle est effectuée en se basant sur une étude de cas réelle, en variant les demandes. Les résultats montrent qu'en choisissant un paramètre de robustesse, qui est introduit par (Bertsimas and Sim, 2004), le modèle robuste est capable de fournir une solution réalisable pour la plupart des scénarios considérés.

(Dimas *et al.*, 2018) propose un modèle linéaire pour traiter le POPM-T1. Le modèle prend en compte les contraintes relatives au temps de stabilisation et à la gestion de stock au niveau de la raffinerie et du centre de distribution. L'objectif est de minimiser le coût opérationnel total. Ce dernier est composé de quatre coûts : le coût de possession du stock, le coût de pompage, le coût lié au volume contaminé entre deux lots successifs et le coût relatif au temps d'arrêt du pipeline. De plus, une procédure de prétraitement nommée « Feasible Space Reduction » est utilisée pour réduire le nombre de variables et de contraintes. Le modèle est évalué sur la base de trois scénarios avec un horizon de planification de 7 jours. Le temps de résolution est limité à deux heures. Les résultats révèlent que le modèle fournit des solutions de

qualité pour les trois scénarios, et la procédure de prétraitement appliquée permet de réduire le temps de calcul.

(BeheshtiAsl and MirHassani, 2019) s’intéresse au POPM-T1 avec l’incertitude sur le débit. Ils affirment que l’incertitude peut être due aux perturbations des opérations de pompage. De ce fait, un modèle linéaire stochastique à deux niveaux est proposé. Il prend en considération les contraintes liées à la gestion de stock et à la satisfaction de la demande avec le minimum de retard. Les auteurs proposent une stratégie de résolution du modèle stochastique en combinant deux méthodes suivantes : « Sample Average Approximation » (SAA) et la « Décomposition de Benders » (DB). Pour évaluer la performance du modèle, trois instances basées sur une étude de cas réelle ont été créées avec respectivement un horizon de 10, 20 et 31 jours. La durée de résolution est limitée à cinq heures. Les résultats montrent que la stratégie de résolution basée sur la « Décomposition de Benders » permet d’obtenir la solution optimale avec un temps de calcul raisonnable pour toutes les instances, alors que la résolution directe ne permet pas de fournir la solution optimale pour les deux dernières instances.

2.3.2 Méthodes approchées

(MirHassani and BeheshtiAsl, 2013) propose une heuristique à base de population pour le POPM-T1. Cette heuristique est composée d’un algorithme de construction et d’une procédure d’amélioration. La méthode de construction permet d’insérer les lots de manière itérative pour créer une solution initiale. La contrainte sur la satisfaction de la demande est relaxée et pénalisée dans la fonction objectif. Cette dernière prend en compte également la minimisation des coûts suivants : le coût lié au temps d’arrêt du pipeline, le coût relatif au volume contaminé entre deux lots successifs et le coût de possession du stock au centre de distribution. La procédure d’amélioration est composée de deux étapes : la première étape vise à réduire le coût de possession du stock de la solution initiale en cherchant à diminuer le volume des lots si possible ; la seconde étape utilise une population des K meilleures solutions trouvées. La mise à jour de la population se fait en effectuant des croisements entre des solutions sélectionnées aléatoirement. La procédure d’amélioration s’arrête lorsqu’il n’y a plus d’amélioration au bout d’un certain nombre d’itérations. L’heuristique proposée est évaluée sur la base d’un ensemble d’instances générées de manière aléatoire à partir d’une étude de cas réelle. Les solutions obtenues sont comparées à celles du modèle de (Cafaro and Cerdá, 2008). Le résultat montre que l’heuristique permet d’obtenir des solutions réalisables avec un temps CPU plus court, notamment dans le cas des instances avec un horizon de planification de 30 jours.

(Kirschstein, 2018) considère le POPM-T1 comme une variante du problème économique de planification des lots « Economic Lot Scheduling Problem » (ELSP) avec des contraintes additionnelles, introduite par (Lopez and Kingsman, 1991). Dans le modèle proposé, l’auteur cherche à fournir un ordonnancement des produits qui permet de satisfaire la demande tout en minimisant le coût de possession du stock ainsi que le coût lié au temps de changement de

produits. Une adaptation de l'heuristique initialement développée par (Dobson, 1992) est proposée pour traiter ce problème. Une procédure de réparation est présentée afin de pouvoir trouver des solutions réalisables. La performance de l'heuristique proposée est mesurée en s'appuyant sur des études de cas prises de l'industrie chimique et pétrolière. En adaptant les données d'entrée, l'heuristique permet de fournir des solutions réalisables.

2.3.3 Méthodes hybrides

(Relvas *et al.*, 2009) présente un système d'aide à la décision pour la résolution du POPM-T1. Il s'agit d'une méthode hybride qui utilise une heuristique pour améliorer la performance du modèle linéaire de (Relvas *et al.*, 2006). L'heuristique crée une séquence de lots sans évaluation, en prenant en compte la compatibilité des produits. Par la suite, le modèle linéaire considère cette séquence comme données d'entrée et cherche à optimiser le volume des lots de cette séquence. considérée se compose des critères d'optimisation présentés dans (Relvas *et al.*, 2006) et de deux critères additionnels, à savoir : la minimisation de l'écart entre le volume des produits transportés et la demande des clients ; la maximisation du stock ayant le niveau le plus bas à la fin de l'horizon de planification. La méthode hybride est évaluée en considérant trois instances basées sur un cas réel : la première instance avec un horizon de planification de 7 jours ; la seconde instance avec un horizon d'un mois ; la dernière instance avec un horizon de six mois consécutifs, où l'heuristique est exécutée successivement 6 fois (les éléments de sortie fournis à la fin de chaque mois sont utilisés comme données d'entrée pour le mois suivant). L'heuristique fournit plusieurs séquences, selon le nombre maximum de lots à planifier. Le modèle linéaire permet d'obtenir des solutions pour certaines de ces séquences.

Récemment, (Bamoumen *et al.*, 2019) proposent une méthode hybride pour le POPM-T1. L'approche est développée sous forme d'un chaînage de deux méthodes : une heuristique de construction et un modèle linéaire considéré comme une procédure d'amélioration. Tout d'abord, l'heuristique construit une solution initiale de manière itérative, tout en considérant les contraintes opérationnelles relatives notamment au temps de stabilisation et à la matrice de compatibilité des produits. Par la suite, le modèle linéaire est utilisé pour optimiser le volume des lots dans la solution initiale sans modifier l'ordre des produits. Une instance basée sur un cas réel avec un horizon de planification d'un mois est utilisée pour évaluer la performance de la méthode hybride. La méthode proposée permet de fournir une solution de bonne qualité dans un délai raisonnable.

2.3.4 Conclusion par rapport aux articles étudiés

Le Tableau 2.1 résume les aspects principaux en commun entre les travaux existants sur le POPM-T1. La première colonne du Tableau 2.1 contient la référence des articles étudiés. La comparaison est effectuée sur la base de la différence entre les colonnes suivantes :

- Les colonnes 2 à 4 indiquent l’approche proposée, qui peut être soit une méthode exacte, une méthode approchée ou une méthode hybride ;
- Les colonnes 5 à 8 illustrent la définition et la modélisation du problème étudié dans chaque article :
 - La colonne 5 concerne la direction du flux, soit unidirectionnel, noté « u », soit bidirectionnel, noté « b » ;
 - Les colonnes 6 et 7 se rapportent respectivement à la formulation du temps et de la taille des lots, qui peuvent être représentés par des variables discrètes ou continues ;
 - La colonne 8 représente les critères d’optimisation utilisés dans la fonction objectif ;
- La dernière colonne 9 porte sur les caractéristiques des instances utilisées dans l’expérimentation numérique. On peut noter que la majorité des instances comportent un nombre de produits similaires. La différence entre ces instances est liée principalement à l’horizon de planification.

a) Comparaison au niveau de la définition du problème

Parmi les travaux existants dans la littérature, on peut constater qu’il existe plusieurs extensions du POPM-T1, en tenant compte des différents types de flux (unidirectionnel ou bidirectionnel) et de l’incertitude sur le débit ou sur les demandes. De plus, pour ceux qui traitent le POPM-T1, on peut remarquer l’existence de différentes contraintes et critères d’optimisation dans la définition du problème. Cela rend la comparaison entre les articles difficile voire impossible.

Au niveau des critères d’optimisation : la totalité des articles considèrent plusieurs critères d’optimisation dans la fonction objectif. Le Tableau 2.2 donne la liste des critères utilisés par les travaux existants dans la littérature sur le POPM-T1. Plusieurs critères peuvent être interchangeables : par exemple les critères Cr2 et Cr3, où la maximisation de temps total opérationnel du pipeline peut représenter la maximisation de la quantité des produits transportés. De plus, il existe des similitudes entre certains critères, notamment entre les critères Cr4 et Cr8 : tous deux ont pour objectif de maximiser le stock à la fin de l’horizon de planification d’une manière différente. D’autres critères sont considérés opposés, comme les critères Cr4 et Cr6 : le premier vise à maximiser le stock ; le second critère minimise le coût de possession du stock. Puisque le coût est proportionnel au stock, alors le critère minimise effectivement le stock.

D’après (Moradi and MirHassani, 2015), un critère d’optimisation dans la fonction objectif peut être considéré comme opérationnel ou économique. Un critère opérationnel vise à améliorer l’efficacité du transport par pipeline, notamment en maximisant le temps opérationnel total de celui-ci. Pour sa part, un critère économique a pour objectif de réduire le coût correspondant. Parmi les critères les plus utilisés figurent la maximisation du temps

opérationnel du pipeline et la minimisation du volume contaminé entre deux lots consécutifs. Certains articles introduisent la minimisation du coût de possession du stock dans la fonction objectif, mais seulement un article prend en compte le critère de minimisation du coût lié au temps de changement de produits (Kirschstein, 2018).

Au niveau des contraintes : les contraintes classiques du POPM-T1 liées notamment à la gestion du stock au centre de distribution sont utilisées par la totalité des articles. Certains articles considèrent des contraintes relatives à la gestion des stocks en amont ((Moradi and MirHassani, 2015), (Dimas *et al.*, 2018)). De plus, la majorité des articles prennent en considération le temps de stabilisation des produits, sauf (Magatão *et al.*, 2004), (Magatão *et al.*, 2011), (Moradi and MirHassani, 2016) et (BeheshtiAsl and MirHassani, 2019). Par ailleurs, la plupart des travaux considèrent la compatibilité des produits dans le POPM-T1. Cependant, seul (Magatão *et al.*, 2011) introduit une contrainte relative à l'utilisation d'un volume de séparation entre les produits.

b) Comparaison des méthodes de résolution

Au niveau de la méthode de résolution proposée : la majorité des travaux existants dans la littérature proposent un modèle linéaire mixte. La résolution des modèles utilise un solveur linéaire et le temps de résolution est souvent limité à quelques heures. On peut constater qu'il est difficile de résoudre un modèle linéaire dans un délai raisonnable, spécifiquement dans le cas d'instances avec un horizon de 30 jours ou plus. C'est pourquoi, certains articles utilisent des procédures de prétraitement (Magatão *et al.*, 2004), (Relvas *et al.*, 2013), (Dimas *et al.*, 2018), ou encore la décomposition de Benders (MirHassani and BeheshtiAsl, 2013) pour réduire le nombre de variables et de contraintes. D'autres utilisent des procédures de prétraitement (Magatão *et al.*, 2004), (Relvas *et al.*, 2013), (Dimas *et al.*, 2018), ou encore la décomposition de Benders (BeheshtiAsl and MirHassani, 2019) pour réduire le nombre de variables et de contraintes.

Par ailleurs, la moitié des articles utilisent des variables discrètes pour modéliser le volume des lots, ce qui permet de diminuer le temps de résolution ((Magatão *et al.*, 2004), (Relvas *et al.*, 2006), (Relvas *et al.*, 2007), (Cafaro and Cerdá, 2008), (Magatão *et al.*, 2011) et (Relvas *et al.*, 2013)). D'autre part, les autres travaux considèrent une formulation continue du volume des lots, ce dernier étant compris entre deux volumes minimum et maximum ((MirHassani and BeheshtiAsl, 2013), (Moradi and MirHassani, 2015), (Moradi and MirHassani, 2016), (Dimas *et al.*, 2018), (Kirschstein, 2018), (BeheshtiAsl and MirHassani, 2019) et (Bamoumen *et al.*, 2019)). La majorité des articles proposent une représentation continue du temps, à l'exception des quelques travaux qui utilisent une discrétisation temporelle : ((Magatão *et al.*, 2004), (Relvas *et al.*, 2013), (Dimas *et al.*, 2018) et (BeheshtiAsl and MirHassani, 2019)).

Parmi les travaux existants dans la littérature, on remarque que seuls deux articles proposent une heuristique pour le POPM-T1. (MirHassani and BeheshtiAsl, 2013) et

(Kirschstein, 2018). Les méthodes approchées sont plus efficaces en termes de temps de calcul, notamment lorsqu’il s’agit de résoudre des instances avec un horizon de 30 jours et plus, mais elles ne garantissent pas l’optimalité des solutions obtenues. Il est constaté que seul (MirHassani and BeheshtiAsl, 2013) considère une instance comportant un horizon de 30 jours. Cependant, les résultats obtenus par l’heuristique ne peuvent pas être comparés à la solution fournie par le modèle linéaire de (Cafaro and Cerdá, 2008). En effet, ce dernier est exécuté sous une limitation de temps CPU d’une heure, et ne trouve pas de solution optimale. De ce fait, (MirHassani and BeheshtiAsl, 2013) affirment uniquement que l’heuristique fournit une solution en un temps raisonnable (douze minutes).

En outre, (Relvas *et al.*, 2009) et (Bamoumen *et al.*, 2019) ont proposé des méthodes hybrides basées sur un chaînage entre une heuristique et un modèle linéaire. L’heuristique proposée dans (Relvas *et al.*, 2009) construit des séquences de produits, et le modèle linéaire optimise le volume des lots. En revanche, (Bamoumen *et al.*, 2019) ont développé une heuristique qui construit un ordonnancement initial des lots. Par la suite, seule la séquence construite est considérée en entrée du modèle qui optimise le volume des lots. Ces méthodes hybrides offrent un compromis entre le temps de résolution et la qualité des solutions.

Il est important de souligner que certaines contributions des travaux concernant le POPM-T1 sont liées à la proposition d’un modèle linéaire mixte qui est détaillé dans ce chapitre. Le modèle fournit un ordonnancement des lots en se basant sur l’axe du temps de déchargement au centre de distribution, et en cherchant à maximiser le temps opérationnel total du pipeline, c’est-à-dire le temps de marche du pipeline, et à minimiser le volume contaminé entre deux lots successifs. La maximisation du temps opérationnel du pipeline est réalisée à partir de la maximisation du volume total envoyé des produits durant l’horizon de planification, ce qui entre dans la stratégie de nombreuses entreprises, notamment en vue de réduire le temps d’arrêt du pipeline. De plus, la minimisation du volume contaminé entre les lots successifs permet d’envoyer un nombre minimum de lots afin d’éviter la contamination des produits. Ainsi, nous présentons le modèle linéaire dans la section suivante.

Tableau 2.1 : Grille d'analyse des articles étudiés portant sur le problème d'ordonnancement du pipeline « One-to-One »

| Référence | Approche proposée | | | Flux | Définition du problème | | | Scénario |
|----------------------------------|---------------------------------|-------------------|--------------------|------|------------------------|------------------------------|------------------------------|----------|
| | Méthode exacte | Méthode approchée | Méthode hybride | | Formulation temporelle | Formulation du volume du lot | Fonction objectif | |
| Shah, 1996 | MILP | | | u | discrète | discrète | Cr1 | 720 |
| Magatão <i>et al.</i> , 2004 | MILP | | | b | discrète | discrète | Cr2, Cr5, Cr9, Cr10 | 120 |
| Relvas <i>et al.</i> , 2006 | MILP | | | u | continue | discrète | Cr2, Cr3, Cr4 | 744 |
| Relvas <i>et al.</i> , 2007 | MILP | | | u | continue | discrète | Cr2, Cr7 | 744 |
| Cafaro and Cerdá, 2008 | MILP | | | u | continue | discrète | Cr1, Cr2, Cr5, Cr6 | 744 |
| Relvas <i>et al.</i> , 2009 | | | heuristique + MILP | u | continue | discrète | Cr2, Cr3, Cr4, Cr7, Cr8 | 744 |
| Magatão <i>et al.</i> , 2011 | CLP-MILP | | | b | continue | discrète | Cr2, Cr5, Cr9 | 144 |
| Relvas <i>et al.</i> , 2013 | MILP | | | u | discrète | discrète / continue | Cr2, Cr7, Cr8 | 744 |
| MirHassani and BeheshtiAsl, 2013 | | heuristique | | u | continue | continue | Cr1, Cr2, Cr5, Cr6 | 744 |
| Moradi and MirHassani, 2015 | MILP | | | u | continue | continue | Cr2, Cr5, Cr6, Cr7, Cr8, Cr9 | 744 |
| Moradi and MirHassani, 2016 | méthode d'optimisation robuste | | | u | continue | continue | Cr5, Cr10 | 744 |
| Kirschstein, 2018 | | heuristique | | u | continue | continue | Cr1, Cr11 | 360 |
| Dimas <i>et al.</i> , 2018 | MILP | | | u | discrète | continue | Cr1, Cr3, Cr5, Cr10 | 168 |
| BeheshtiAsl and MirHassani, 2019 | MILP + décomposition de Benders | | | u | discrète | continue | Cr5, Cr6, Cr10 | 744 |
| Bamoumen <i>et al.</i> , 2019 | | | heuristique + MILP | u | continue | continue | Cr1, Cr2, Cr5, Cr6 | 720 |

Tableau 2.2 : Liste des critères d'optimisation utilisés par les articles étudiés

| Code du critère | Critère d'optimisation |
|-----------------|---|
| Cr1 | minimiser le coût de possession du stock |
| Cr2 | maximiser le temps opérationnel total du pipeline |
| Cr3 | maximiser le volume des produits transportés |
| Cr4 | maximiser le stock total à la fin de l'horizon de planification |
| Cr5 | minimiser le coût lié au volume contaminé entre deux lots successifs |
| Cr6 | minimiser le coût relatif à la livraison des produits avec retard |
| Cr7 | minimiser l'écart entre le volume des produits transportés et la demande totale des clients |
| Cr8 | maximiser le stock ayant le niveau le plus bas parmi tous les produits |
| Cr9 | minimiser la variation des coûts de l'électricité pendant les heures de pointe |
| Cr10 | minimiser le coût de pompage |
| Cr11 | minimiser le coût relatif au temps de changement de produits |

2.4 Modélisation mathématique proposée dans cette thèse

2.4.1 Introduction

Nous proposons dans cette section un nouveau modèle linéaire mixte pour le POPM-T1. La modélisation est inspirée des modèles existants dans la littérature, notamment ((Relvas *et al.*, 2006), (Cafaro and Cerdá, 2008) et (MirHassani and BeheshtiAsl, 2013)), en apportant des améliorations. Le modèle proposé a été présenté à la conférence internationale « IFAC MIM on Manufacturing, Modeling, Management and Control » en 2019 (Bamoumen *et al.*, 2019). Il est constaté que la plupart des modèles utilisent un axe de temps positionné en amont du pipeline à la raffinerie. Un tel choix nécessite un axe auxiliaire en aval au centre de distribution lors du déchargement des lots. Par conséquent, la détermination des lots est plus difficile, dans ce cas, puisqu'il faut garantir que tous les lots chargés dans le pipeline arrivent à destination. De plus, il faut que la date de fin de déchargement du dernier lot soit avant ou coïncide avec la fin de l'horizon de planification.

Nous proposons une modélisation originale en n'utilisant qu'un seul axe de temps positionné en aval au centre de distribution. Dans le modèle proposé, la date « 0 » signifie la date de début de déchargement du premier lot au centre de distribution ; à la fin de l'horizon de planification, tous les lots planifiés doivent être déchargés. Les dates de début et de fin de chargement des lots à la raffinerie peuvent être déduites à partir de celles de déchargement.

La Figure 2.3 illustre la formulation temporelle utilisée dans le modèle proposé. Nous utilisons des variables continues pour la formulation du temps et du volume des lots. L'horizon de planification est discrétisé en périodes journalières pour contrôler la livraison des produits et les opérations de déchargement des lots. Le modèle comporte deux variables de décision pour la détermination des lots à charger dans le pipeline :

- La variable binaire $y_{i,p}$ décrit l'affectation du produit p au lot i si $y_{i,p} = 1$;

- La variable continue Q_i représente le volume du lot i .

Comme illustré dans la Figure 2.3, nous distinguons entre la durée théorique et la durée opérationnelle de déchargement du lot i . La première durée est déterminée en se basant uniquement sur le volume du lot Q_i et le débit vb ; tandis que la seconde est calculée en considérant les éventuels temps d'arrêt du pipeline, notés $DA_{i,t}$, dus au dépassement de la capacité des stocks durant les opérations de déchargement. Par ailleurs, le temps de stabilisation du lot i , noté ST_i , dépend de son produit p et égale à st_p , qui renvoie au temps durant lequel le produit p est contenu dans le stock au centre de distribution, pour des raisons de contrôle de qualité. A la fin de la durée de stabilisation, le lot i contenant le produit p est disponible pour être livré aux clients à la date RT_i . De plus, toutes les opérations de déchargement doivent être terminées avant la fin de l'horizon de planification h_{max} .

Nous présentons tout d'abord les notations utilisées dans la section (2.4.2) ; puis les contraintes du modèle dans la section (2.4.3) ; la fonction objectif dans la section (2.4.4) ; avant de décrire comment adapter le modèle proposé au cas de l'OCP dans la section (2.4.5).

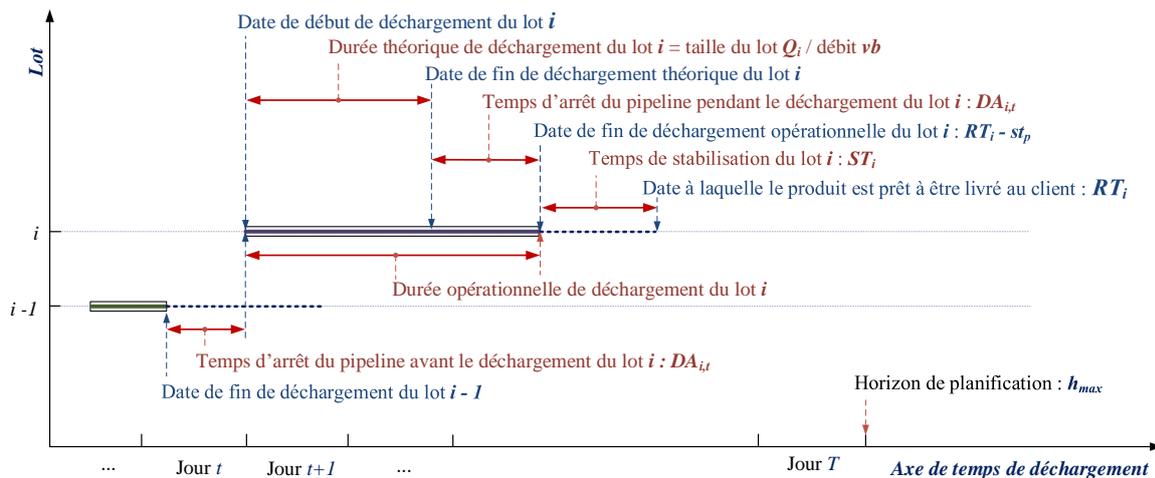


Figure 2.3 : Opérations de déchargement des lots

2.4.2 Notations

2.4.2.1 Notations des paramètres

| | |
|-------------|---|
| N | : nombre maximum des lots qui peuvent être chargés dans le pipeline |
| P | : nombre de produits |
| h_{max} | : longueur de l'horizon de planification (en heures) |
| T | : nombre de périodes journalières composant l'horizon de planification (en jours) |
| CF | : volume contaminé entre deux lots consécutifs |
| $dem_{p,t}$ | : demande du produit p à satisfaire au jour t |
| $I Amax_p$ | : capacité maximale du stock contenant le produit p |

| | | |
|-----------------|---|--|
| $IAmin_p$ | : | capacité minimale du stock contenant le produit p |
| $IDmax_p$ | : | capacité maximale du stock contenant le produit p prêt à être livré aux clients |
| $IDmin_p$ | : | capacité minimale du stock contenant le produit p prêt à être livré aux clients |
| $Vmin_p/Vmax_p$ | : | taille minimale/maximale d’un lot comportant le produit p |
| st_p | : | temps de stabilisation du produit p |
| vb | : | débit du pipeline |
| $s_{p,q}$ | : | élément de la matrice de compatibilité entre deux lot consécutifs comportant les produits p et q |
| M | : | un grand nombre |

2.4.2.2 Notations des variables

La formulation linéaire se base sur quinze variables continues et sur quatre variables binaires :

- Variables continues :

| | | |
|-------------------|---|---|
| Q_i | : | taille du lot i |
| $Qmin_i / Qmax_i$ | : | taille minimale/maximale du lot i , selon la valeur de $y_{i,p}$ |
| $IA_{p,t}$ | : | stock total du produit p à la fin du jour t , y compris les lots en période de stabilisation |
| $ID_{p,t}$ | : | stock du produit p prêt à satisfaire la demande des clients à la fin du jour t |
| RT_i | : | date à laquelle le lot i est libéré après le temps de stabilisation (en heures) |
| $vc_{i,t}$ | : | volume cumulé du lot i déchargé à la fin du jour t |
| $vj_{i,t}$ | : | volume journalier du lot i déchargé au jour t |
| $vs_{i,t}$ | : | volume du lot i disponible après le temps de stabilisation à la fin du jour t |
| $vjIA_{i,p,t}$ | : | volume déchargé du lot i comportant le produit p au jour t |
| $vsID_{i,p,t}$ | : | volume déchargé du lot i comportant le produit p prêt à être livré aux clients à la fin du jour t |
| $DA_{i,t}$ | : | durée d’arrêt du pipeline, causée par la saturation de la capacité de stock, avant le déchargement du lot i au jour t |
| $DA_{N+1,t}$ | : | durée d’arrêt du pipeline après le déchargement de tous les lots au jour t |
| nb | : | nombre des lots planifiés |
| ST_i | : | temps de stabilisation du lot i , dépendant de la valeur de $y_{i,p}$ |

- Variables binaires :

| | | |
|--------------|---|--|
| $y_{i,p}$ | : | variable binaire égale à 1 si lot i comporte le produit p ; 0 sinon |
| $z_{i,t}$ | : | variable binaire égale à 1 s’il existe une temps d’arrêt du pipeline avant le déchargement du lot i au jour t ; 0 sinon |
| $fsID_{i,t}$ | : | variable binaire égale à 1 si le lot i est libéré après le temps de stabilisation ST_i au jour t ; 0 sinon |
| $fsIA_{i,t}$ | : | variable binaire égale à 1 si le lot i est libéré après le temps de stabilisation ST_i au jour t , et pour tous les jours $t' = t + 1, \dots, T$; 0 sinon |

2.4.3 Contraintes du modèle

Le modèle linéaire proposé comporte six groupes de contraintes ci-dessous :

- Sur la détermination des lots (groupe 1 : contraintes 1 à 8) : ce groupe de contraintes modélisent à la fois les contraintes liées à l'allocation des produits (contraintes 1 à 4), aux séquences autorisées entre les lots (contrainte 5), et à la définition du volume des lots (contraintes 6 à 8).
- Sur la détermination du volume de lots en stabilisation (groupe 2 : contraintes 9 à 14) : elles définissent le volume journalier déchargé (contraintes 9 et 10), le volume déchargé cumulé (contraintes 13 et 14) ainsi que le volume déchargé des lots prêts à satisfaire la demande des clients (contraintes 11 et 12).
- Sur la détermination du volume de déchargement journalier des lots (groupe 3 : contraintes 15 à 19) : elles contrôlent les opérations de déchargement des lots, en déterminant les durées de déchargement sur chaque jour de l'horizon de planification.
- Sur la stabilisation des lots (groupe 4 : contraintes 20 à 27) : elles déterminent la date de fin de déchargement des lots ainsi que la date à laquelle les lots sont libérés pour être livrés aux clients.
- Sur les arrêts du pipeline (groupe 5 : contraintes 28 à 32) : elles établissent les conditions de définition des durées d'arrêt du pipeline.
- Sur la mise à jour des stocks (groupe 6 : contraintes 33 à 36) : elles contrôlent les opérations de stockage des produits au niveau du centre de distribution.

2.4.3.1 Contraintes 1 : définition des lots

La détermination des lots regroupe trois types de contraintes :

- Les contraintes liées à l'allocation des produits aux lots ;
- Les contraintes relatives à la détermination des séquences autorisées entre les lots (utilisant la matrice de compatibilité) ;
- Les contraintes qui définissent le volume des lots.

2.4.3.1.1 Allocation des produits

La variable binaire $y_{i,p}$ spécifie l'affectation du produit p au lot i . Chaque lot doit contenir un seul produit. Ceci est exprimé par la contrainte (1), où N est le nombre maximum de lots :

$$\sum_{p=1,\dots,P} y_{i,p} \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (1)$$

De plus, la variable nb représente le nombre de lots réellement planifiés. La contrainte (2) est introduite pour déterminer le nombre de lots nb . Les lots numérotés de $(nb + 1)$ à N ne

seront pas planifiés. La contrainte (3) permet de désactiver l’allocation des produits pour les lots non planifiés et la contrainte (4) permet de fixer le volume de ces lots à 0.

$$\sum_{i=1,\dots,N} \sum_{p=1,\dots,P} y_{i,p} = nb \quad (2)$$

$$\sum_{p=1,\dots,P} y_{i,p} \leq \sum_{p=1,\dots,P} y_{i-1,p} \quad \forall i = 2, \dots, N \quad (3)$$

$$Q_i - M \sum_{p=1,\dots,P} y_{ip} \leq 0 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (4)$$

2.4.3.1.2 Séquences autorisées des lots

Les séquences possibles des lots sont déterminées sur la base de la matrice de compatibilité s . Un élément de la matrice $s_{p,q}$ est égal à « 1 » si la séquence successive des produits (p, q) est autorisée. La contrainte (5) définit les séquences possibles entre deux lots successifs $(i - 1)$ et i , comportant les produits p et q respectivement.

$$y_{i-1,p} + y_{i,q} \leq 1 + s_{p,q} \quad \forall i = 2, \dots, N, p = 1, \dots, P; q = 1, \dots, P \quad (5)$$

2.4.3.1.3 Détermination de l’intervalle du volume de lots

Comme représenté par la contrainte (6), deux variables $Qmin_i$ et $Qmax_i$ sont introduites pour définir de l’intervalle du volume de lots. Le volume de lots Q_i doit être compris dans l’intervalle de $Qmin_i$ à $Qmax_i$. Cette modélisation du volume permet de pouvoir choisir n’importe quelle valeur de l’intervalle défini, contrairement à d’autres modélisations qui facilitent ce problème dans la littérature, notamment (Cafaro and Cerdá, 2008) : les auteurs proposent de choisir le volume des lots parmi un ensemble de volumes candidats.

$$Qmin_i \leq Q_i \leq Qmax_i \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (6)$$

Les deux bornes de l’intervalle d’un lot dépendent du produit affecté au lot. Les contraintes (7) et (8) décrivent la détermination de $Qmin_i$ et $Qmax_i$, selon le produit affecté : si le lot i contient le produit p ($y_{i,p} = 1$), alors la variable $Qmin_i$ est égale à $Vmin_p$, et la variable $Qmax_i$ est égale à $Vmax_p$.

$$\begin{aligned} -M * (1 - y_{i,p}) + Vmin_p &\leq Qmin_i \\ &\leq M * (1 - y_{i,p}) + Vmin_p \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N, p = 1, \dots, P \quad (7)$$

$$\begin{aligned} -M * (1 - y_{i,p}) + Vmax_p &\leq Qmax_i \\ &\leq M * (1 - y_{i,p}) + Vmax_p \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N, p = 1, \dots, P \quad (8)$$

2.4.3.2 Contraintes 2 : détermination du volume des lots en stabilisation

Deux variables sont introduites décrivant le volume de déchargement d'un lot au centre de distribution :

- la variable $vjIA_{i,p,t}$: le volume déchargé du lot i contenant le produit p au jour t ;
- La variable $vj_{i,t}$: le volume journalier du lot i déchargé au jour t .

la variable $vjIA_{i,p,t}$ est égale à $vj_{i,t}$, si le produit p est affecté au lot i (i.e. $y_{i,p} = 1$). Dans le cas contraire, elle est fixée à 0. Les contraintes (9) et (10) établissent la relation entre les trois variables citées ci-dessus.

$$\begin{aligned} -M * (1 - y_{i,p}) + vj_{i,t} &\leq vjIA_{i,p,t} & \forall i = 1, \dots, N, p = 1, \dots, P; t \\ &\leq M * (1 - y_{i,p}) + vj_{i,t} & = 1, \dots, T \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} -M * y_{i,p} &\leq vjIA_{i,p,t} \leq M * y_{i,p} & \forall i = 1, \dots, N, p = 1, \dots, P; t \\ & & = 1, \dots, T \end{aligned} \quad (10)$$

Les contraintes (11) et (12) sont introduites pour déterminer le volume d'un lot contenant le produit p prêt à être livré aux clients après le temps de stabilisation. Pour ce faire, deux variables ci-dessous sont utilisées :

- La variable $vsID_{i,p,t}$: le volume du lot i comportant le produit p prêt à être livré aux clients au jour t , après le temps de stabilisation st_p ;
- La variable $vs_{i,t}$: le volume du lot i disponible après le temps de stabilisation à la fin du jour t .

Semblables aux deux contraintes précédentes, les contraintes (11) et (12) assurent la relation les trois variables suivantes : $vsID_{i,p,t}$, $vs_{i,t}$ et $y_{i,p}$. La variable $vsID_{i,p,t}$ égale à $vs_{i,t}$ si le lot i contient le produit p (i.e. $y_{i,p} = 1$) ; sinon, elle est fixée à 0.

$$\begin{aligned} -M * (1 - y_{i,p}) + vs_{i,t} &\leq vsID_{i,p,t} & \forall i = 1, \dots, N, p = 1, \dots, P; t \\ &\leq M * (1 - y_{i,p}) + vs_{i,t} & = 1, \dots, T \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} -M * y_{i,p} &\leq vsID_{i,p,t} \leq M * y_{i,p} & \forall i = 1, \dots, N, p = 1, \dots, P; t \\ & & = 1, \dots, T \end{aligned} \quad (12)$$

La variable $vs_{i,t}$ est déterminée en utilisant les contraintes (13) et (14). Ces dernières introduisent une variable binaire auxiliaire notée $fsID_{i,t} : = 1$ si le lot i est libéré au jour t pour être livré aux clients après le temps de stabilisation. Dans ce cas, le volume disponible $vs_{i,t}$ est égal au volume de déchargement cumulé du lot i au jour t , noté $vc_{i,t}$. Il faut noter qu'à la fin du déchargement, le volume cumulé $vc_{i,t}$ est égal au volume du lot Q_i . La contrainte (14) traite le cas où le volume du lot i n'est pas encore disponible : la variable $vs_{i,t}$ est fixée à 0.

$$vc_{i,t} - M * (1 - fSID_{i,t}) \leq vs_{i,t} \leq vc_{i,t} + M * (1 - fSID_{i,t}) \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (13)$$

$$vs_{i,t} \leq M * fSID_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (14)$$

2.4.3.3 Contraintes 3 : détermination du volume déchargé journalier des lots

Les contraintes (15) à (17) permettent de déterminer le volume de déchargement journalier des lots au centre de distribution. La contrainte (15) établit la relation entre le volume du lot i déchargé au jour t ($vj_{i,t}$) et le volume de déchargement cumulé du lot i au jour t ($vc_{i,t}$). Ce dernier est la somme des volumes journaliers depuis le début du déchargement du lot i jusqu'au jour t . Il peut être déterminé en considérant le volume cumulé du jour précédent ($t - 1$), auquel est ajouté le volume journalier déchargé $vj_{i,t}$.

$$vc_{i,t} = vc_{i,t-1} + vj_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (15)$$

La contrainte (16) garantit la conservation du temps opérationnel journalier, en considérant la durée de déchargement des lots et le temps d’arrêt du pipeline avant une opération de déchargement. Notons que la variable $DA_{N+1,t}$ avec l'introduction d'un lot fictif de numéro $(N + 1)$ désigne l'arrêt du pipeline avant le déchargement du lot $(N + 1)$, qui donne en fait l'arrêt du pipeline après le déchargement d'un total de N lots. Pour une période journalière t , la durée totale de déchargement est représentée par $\sum_{i=1,\dots,N} \frac{vj_{i,t}}{vb}$, où le paramètre vb est le débit du pipeline. Le temps total d’arrêt du pipeline au jour t est déterminé par $\sum_{i=1,\dots,N} DA_{i,t} + DA_{N+1,t}$.

$$\frac{1}{vb} \sum_{i=1,\dots,N} vj_{i,t} + \sum_{i=1,\dots,N} DA_{i,t} + DA_{N+1,t} = 24 \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (16)$$

La contrainte (17) assure que pour chaque lot i , la somme de tous les volumes journaliers déchargés sur l’horizon de planification $\sum_{t=1,\dots,T} vj_{i,t}$ doit être égale au volume du lot Q_i .

$$\sum_{t=1,\dots,T} vj_{i,t} = Q_i \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (17)$$

Les contraintes (18) et (19) déterminent le volume journalier déchargé $vj_{i,t}$. Pour cela, une variable binaire auxiliaire $fSIA_{i,t}$ est introduite : =1 si le déchargement du lot i est terminé au jour $t - 1$; =0 sinon. La contrainte (18) (voir Figure 2.4) indique que le volume de déchargement journalier du lot i doit être nul si le déchargement s'est terminé. La contrainte (19) assure que le déchargement du lot i peut avoir lieu si le lot précédent est déchargé. La Figure 2.5 illustre l'ordre de déchargement des lots successifs assuré par la variable $fSIA_{i,t}$.

$$-M * (1 - fsIA_{i,t}) \leq vj_{i,t} \leq M * (1 - fsIA_{i,t}) \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (18)$$

$$-M * fsIA_{i-1,t+1} \leq vj_{i,t} \leq M * fsIA_{i-1,t+1} \quad \forall i = 2, \dots, N; t = 1, \dots, T - 1 \quad (19)$$

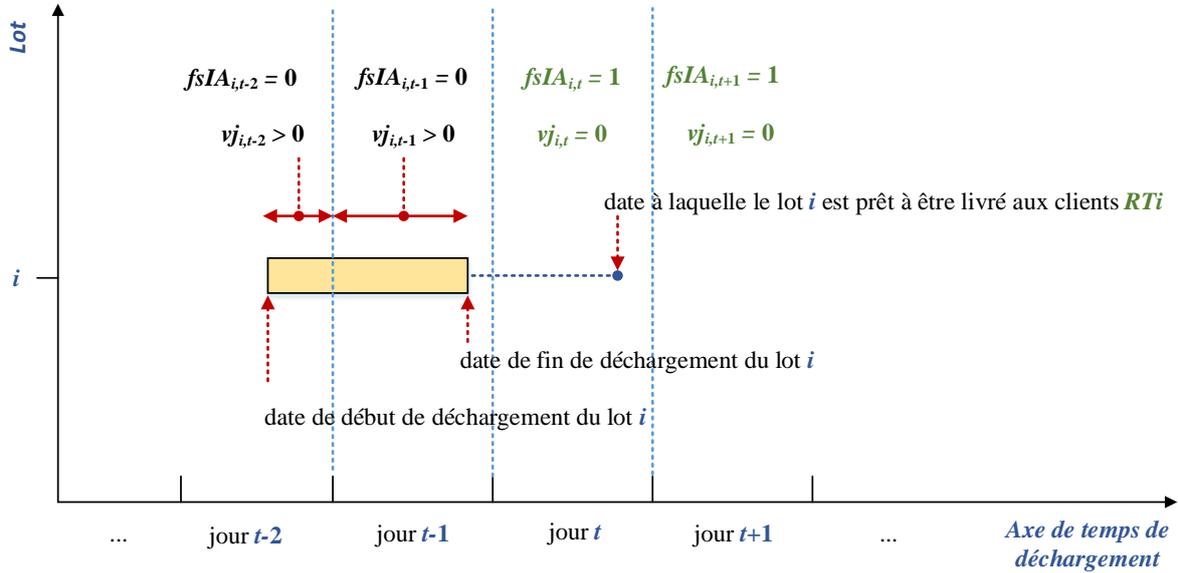


Figure 2.4 : Relation entre le volume journalier déchargé du lot i $vj_{i,t}$ et la variable binaire $fsIA_{i,t}$

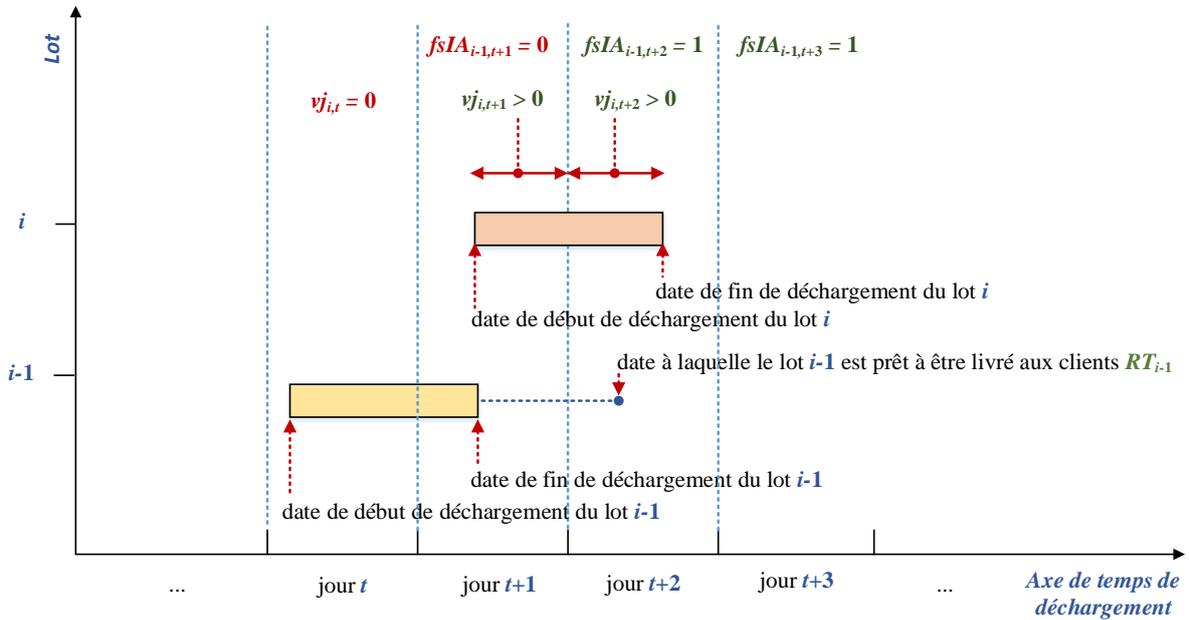


Figure 2.5 : Ordre de déchargement des lots successifs assuré par la variable binaire $fsIA_{i,t}$

2.4.3.4 Contraintes 4 : contraintes liées à la stabilisation des lots

Les contraintes (20) et (21) déterminent la date de fin de déchargement des lots. Les deux variables ci-dessous sont utilisées pour décrire la date de fin de déchargement d'un lot i :

- La durée de stabilisation : ST_i ;
- La date de fin de stabilisation : RT_i .

$(RT_i - ST_i)$ donne donc la date de fin de déchargement du lot i . Comme décrit dans la contrainte (20), cette date est déterminée en se basant sur la date de fin de déchargement du lot précédent $(i - 1)$, à laquelle sont ajoutées la durée de déchargement du lot i et la somme des durées d’arrêt du pipeline avant le déchargement du lot i $\sum_{t=1, \dots, T} DA_{i,t}$.

$$(RT_i - ST_i) = (RT_{i-1} - ST_{i-1}) + \frac{Q_i}{vb} + \sum_{t=1, \dots, T} DA_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (20)$$

La contrainte (21) donne le temps d’arrêt du pipeline $\sum_{t=1, \dots, T} DA_{N+1,t}$ après la date de fin du déchargement du dernier lot, notée $(RT_N - ST_N)$. Le déchargement du dernier lot doit se terminer avant la fin de l’horizon de planification.

$$h_{max} = (RT_N - ST_N) + \sum_{t=1, \dots, T} DA_{N+1,t} \quad (21)$$

La contrainte (22) détermine la variable ST_i en fonction du produit affecté au lot i . Dans le cas où le lot i n’est pas utilisé, la variable ST_i est fixée à 0 par la contrainte (23).

$$st_p - M * (1 - y_{i,p}) \leq ST_i \leq st_p + M * (1 - y_{i,p}) \quad \forall i = 1, \dots, N, p = 1, \dots, P \quad (22)$$

$$0 \leq ST_i \leq M \sum_{p=1, \dots, P} y_{ip} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (23)$$

La contrainte (24) réalise la relation entre RT_i la date de fin de stabilisation du lot i (en heures) et $fsIA_{i,t}$ le jour de fin de stabilisation.

$$\frac{[t * 24 - RT_i]}{M} < fsIA_{i,t} \leq 1 + \frac{[t * 24 - RT_i]}{M} \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (24)$$

La contrainte (25) détermine $fsID_{i,t+1}$ le jour de fin de stabilisation du lot i , à partir du jour de fin de déchargement $fsIA_{i,t}$, du volume du lot Q_i et du volume de déchargement cumulé du lot i . La contrainte (26) définit la relation entre $fsIA_{i,t}$ et $fsID_{i,t}$, et la contrainte (27) assure que la fin de stabilisation du lot i aura lieu dans un seul jour si le lot i est planifié.

$$\frac{vc_{i,t} - Q_i}{M} - fsIA_{i,t} < fsID_{i,t+1} \leq 1 + \frac{vc_{i,t} - Q_i}{M} - fsIA_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (25)$$

$$fsIA_{i,t} \geq fsID_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (26)$$

$$\sum_{t=2,\dots,T+1} fSIDj_{i,t} = \sum_{p=1,\dots,P} y_{i,p} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (27)$$

2.4.3.5 Contraintes 5 : contraintes relatives aux arrêts du pipeline

Deux variables ci-dessous sont utilisées dans la détermination des arrêts du pipeline :

- La variable binaire $z_{i,t}$: =1 s'il existe un temps d'arrêt du pipeline durant le déchargement du lot i au jour t , =0 sinon ;
- La variable $DA_{i,t}$: la durée de l'arrêt du pipeline si $z_{i,t}$ vaut 1.

Les contraintes (28) à (29) assurent la relation entre les deux variables ci-dessus. La durée d'arrêt du pipeline $DA_{i,t}$ est fixée à 0 si $z_{i,t}$ vaut 0. Par ailleurs, la variable $DA_{N+1,t}$ donne la durée d'arrêt du pipeline après le déchargement de tous les lots.

$$0 \leq DA_{i,t} \leq 24 * z_{i,t} \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 1, \dots, T \quad (28)$$

$$0 \leq DA_{N+1,t} \leq 24 * z_{N+1,t} \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (29)$$

Les contraintes (30) et (31) établissent la relation entre les deux variables binaires $z_{i,t}$ et $fSIA_{i,t}$. L'arrêt du pipeline avant le déchargement du lot i au jour $(t - 1)$ aura lieu que durant le déchargement d'un lot. Le jour où débute le déchargement du lot i est donné par $fSIA_{i-1,t}$ qui désigne la fin de déchargement du lot précédent $(i - 1)$ au jour $(t - 1)$.

$$z_{i,t-1} \leq fSIA_{i-1,t} \quad \forall i = 2, \dots, N; t = 2, \dots, T \quad (30)$$

$$z_{N+1,t-1} \leq fSIA_{N,t} \quad \forall t = 2, \dots, T \quad (31)$$

La contrainte (32) permet de fixer la variable $z_{i,t-1}$ à 0 après le déchargement complet du lot i . La Figure 2.6 illustre un exemple sur la détermination des arrêts du pipeline durant le déchargement du lot i .

$$z_{i,t-1} + fSIA_{i,t} \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, N; t = 2, \dots, T \quad (32)$$

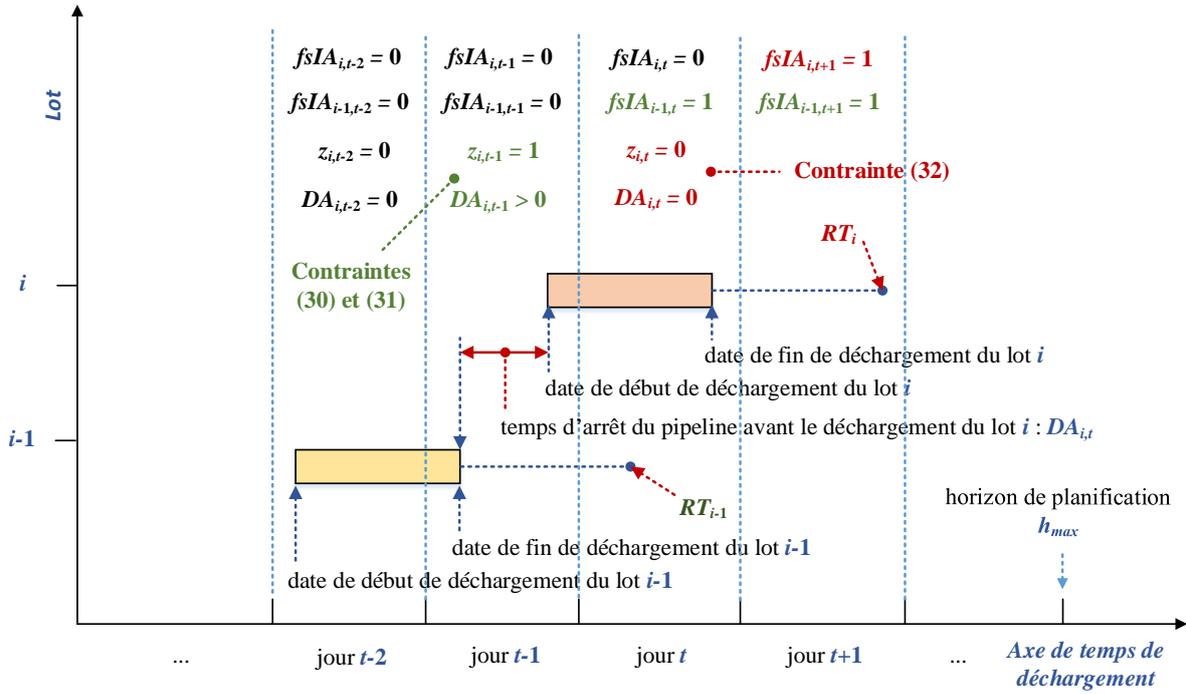


Figure 2.6 : Schéma représentant les conditions qui autorisent un arrêt du pipeline

2.4.3.6 Contraintes 6 : contraintes de gestion des stocks

Les contraintes (33) à (36) assurent la mise à jour des stocks au centre de distribution. La variable $IA_{p,t}$ est le stock total du produit p à la fin du jour t , dans lequel sont compris les lots en période de stabilisation.

La contrainte (33) détermine la variable $IA_{p,t}$ à partir du stock du jour précédent, en incluant le volume journalier déchargé des lots contenant le produit p , et en retranchant la demande du jour t . De plus, le stock total $IA_{p,t}$ doit être compris entre ses deux niveaux minimum et maximum, selon le produit p , comme décrit par la contrainte (34).

$$IA_{p,t} = IA_{p,t-1} - dem_{p,t} + \sum_{i=1,\dots,N} v_j IA_{ipt} \quad \forall p = 1, \dots, P; t = 1, \dots, T \quad (33)$$

$$IA_{min_p} \leq IA_{p,t} \leq IA_{max_p} \quad \forall p = 1, \dots, P; t = 1, \dots, T \quad (34)$$

La variable $ID_{p,t}$ correspond au stock du produit p qui est prêt à être livré aux clients. Comme établi par la contrainte (35), le calcul de $ID_{p,t}$ se base sur le stock du jour précédent, auquel est ajoutée la somme des volumes des lots comportant le produit p après la période de stabilisation au jour t ($\sum_{i=1,\dots,N} vsID_{ipt}$), et en retirant la demande du produit p au même jour t . D'autre part, la contrainte (36) définit les niveaux minimum et maximum de stock pour $ID_{p,t}$.

$$ID_{p,t} = ID_{p,t-1} - dem_{p,t} + \sum_{i=1,\dots,N} vsID_{ipt} \quad \forall p = 1, \dots, P; t = 1, \dots, T \quad (35)$$

$$IDmin_p \leq ID_{p,t} \leq IDmax_p \quad \forall p = 1, \dots, P; t = 1, \dots, T \quad (36)$$

2.4.4 Fonction objectif

La fonction objectif du modèle utilise les deux critères d'optimisation suivants :

- Maximisation du volume total des lots transportés ($T1$) :

$$T1 = \sum_{i=1, \dots, N} Q_i$$

- Minimisation du volume total contaminé entre les lots successifs ($T2$) (voir Figure 2.7) :

$$T2 = CF * (nb - 1)$$

Ainsi, la fonction objectif est représentée comme suit :

$$(\max) T1 - T2$$

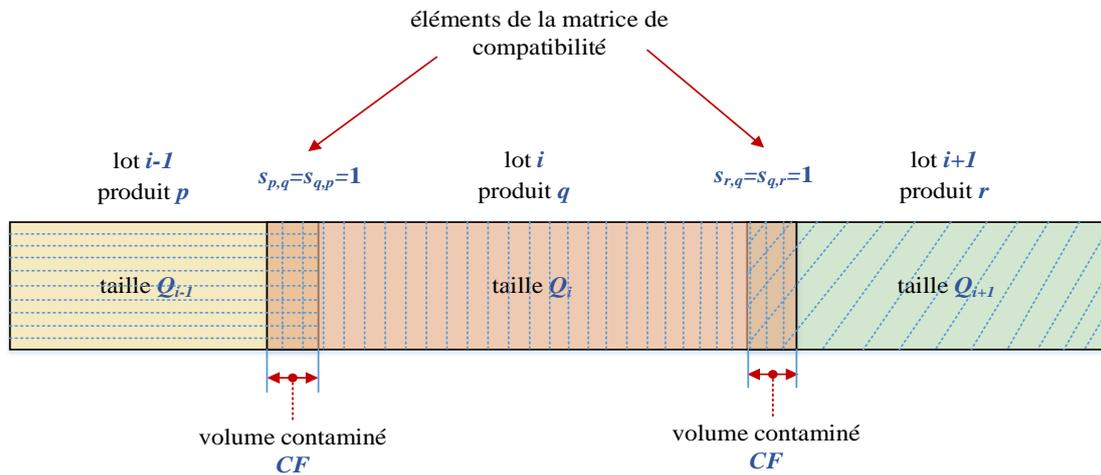


Figure 2.7 : Modélisation du volume contaminé entre les lots successifs

Le premier critère $T1$ a pour objectif de maximiser le temps opérationnel total du pipeline, en transportant le maximum de volume des lots planifiés. Ce critère maximise également le stock total à la fin de l'horizon de planification lorsque la demande et le stock initial sont statiques. Le second critère $T2$ cherche à minimiser le volume total contaminé entre les lots successifs. Il revient à minimiser le nombre de lots à transporter dans le pipeline, car le volume contaminé entre deux lots successifs est considéré comme une donnée fixe. Le critère $T2$ permet de réduire le nombre changements de produits à la raffinerie et au centre de distribution. De plus, ce critère minimise le coût lié au traitement du volume contaminé.

Il est intéressant de noter qu'il est possible de convertir les deux critères opérationnels ci-dessus en des critères économiques, en introduisant un coût à chacun d'entre eux.

La Figure 2.8 illustre un exemple de solution sous forme d'un planning de déchargement des lots au centre de distribution. D'après cet exemple, il est constaté que dans certains cas, les lots planifiés peuvent être déchargés directement l'un après l'autre (lots 1 et 2) ; dans d'autres

cas, un temps d’arrêt du pipeline peut séparer entre la fin de déchargement d’un lot et le début de déchargement du lot suivant (lots $(i - 1)$ et i). De plus, un temps d’arrêt peut exister après la date de fin de déchargement du dernier lot nb si celle-ci ne coïncide pas avec la fin de l’horizon de planification h_{max} . Il est également remarqué qu’une fois que le nombre de lots à planifier nb est défini par le modèle, les lots $i = nb + 1, \dots, N$ ne contiennent aucun produit et possèdent un volume $Q_i = 0, \forall i = nb + 1, \dots, N$.

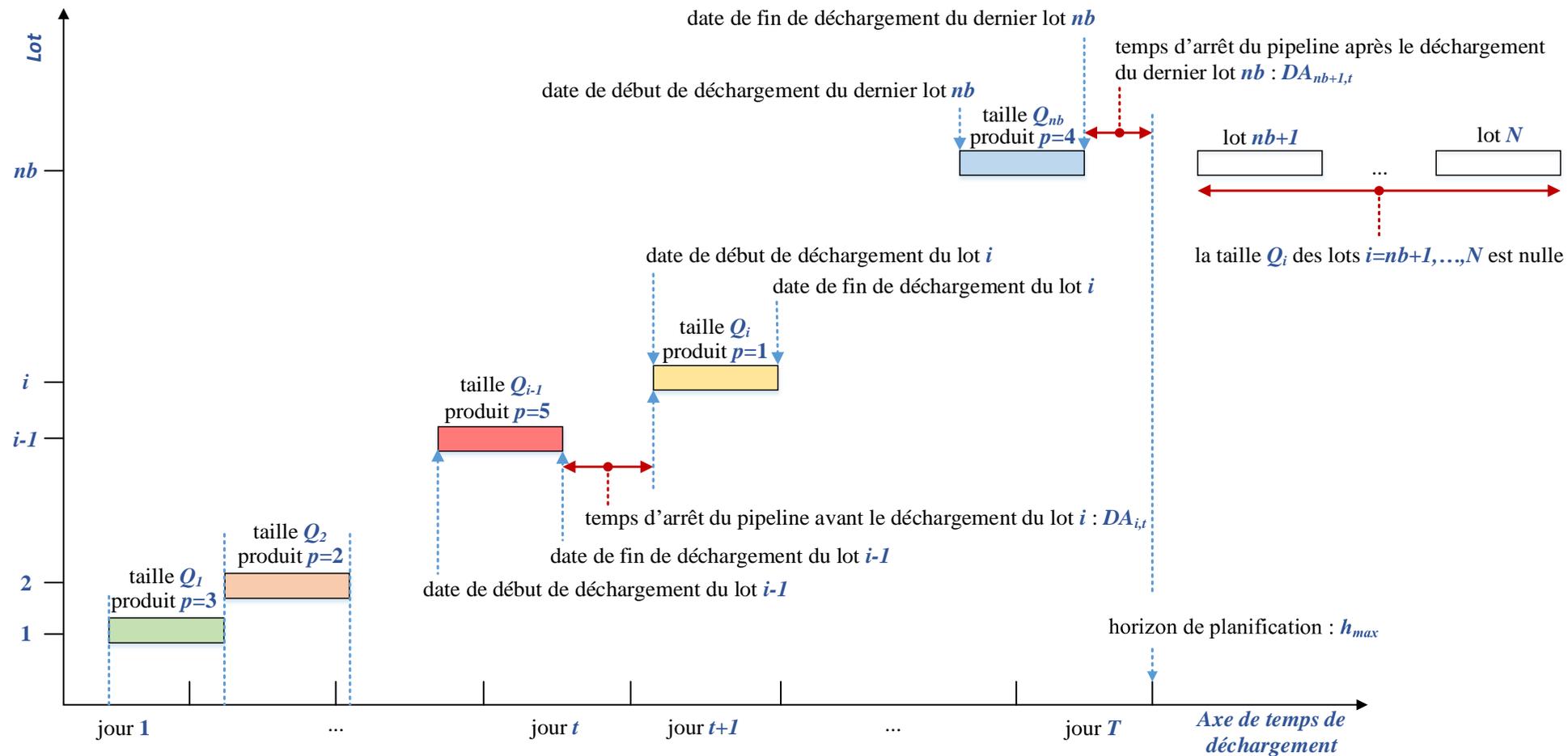


Figure 2.8 : Exemple de solution représentant un ordonnancement des lots

2.4.5 Adaptation du modèle linéaire au cas de l'OCP

La modélisation proposée ci-dessus est considérée pour le problème d'ordonnement de pipeline multiproduits de type « one-to-one », dans le contexte de l'industrie pétrolière. Néanmoins, le modèle peut être adapté pour étudier le problème d'ordonnement du réseau de pipelines OCP, lorsque celui-ci fonctionne pour la satisfaction de deux demandes au plus. Pour cela, il est nécessaire de modifier certains paramètres d'entrée, à savoir : le temps de stabilisation st_p et la matrice de compatibilité des produits s .

En effet, le temps de stabilisation st_p doit être nul dans le cas de l'ordonnement du réseau de pipelines OCP, puisque contrairement aux produits pétroliers, les produits de phosphate peuvent être livrés directement au clients, sans avoir recours à un temps de stabilisation : les opérations de remplissage et de soutirage des bacs de la station terminale, en aval du pipeline principal, sont ainsi réalisées de manière simultanées.

Par ailleurs, la matrice de compatibilité des produits s peut être modifiée de façon à prendre en considération la séparation des lots contenant les produits de phosphate, comme l'illustre la Figure 2.9. Celle-ci représente deux exemples de matrices de compatibilité pour quatre produits : l'une, à gauche, est utilisée pour les produits pétroliers, numérotés de 1 à 4 ; l'autre, à droite, est considérée pour les produits de phosphate, numérotés et 1 à 3, et l'eau, désigné par le produit « 0 », qui est utilisé pour séparer entre les lots de phosphate. On remarque donc, à partir de la matrice de droite, que $s_{p,q} = 1$ concerne uniquement les éléments qui comporte un produit de phosphate et l'eau.

Compatibilité entre les produits pétroliers

| | | Produit q | | | |
|-------------|---|-------------|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Produit p | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| | 3 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| | 4 | 1 | 0 | 1 | 0 |

Compatibilité des produits de phosphate

| | | Produit q | | | |
|-------------|---|-------------|---|---|---|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Produit p | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Figure 2.9 : Exemples de matrices de compatibilités des produits (cas des produits pétroliers et des produits de phosphate)

2.5 Expérimentations numériques

2.5.1 Environnements de l'expérimentation et instances utilisées

Tous les tests sont effectués sur un PC doté d'un processeur Intel Xenon Platinum 8160 (2.10GHz) sous Linux (Fedora release 29). Le modèle linéaire est résolu en utilisant le solveur Gurobi (version 9.0.2) et le nombre de cœurs est limité à 64. Nous utilisons la bibliothèque Gurobi en Java pour accéder au solveur. Le programme de test est développé en Java (JDK 1.8) sous NetBeans (version 8.2). La durée de résolution par instance est limitée à 24 heures.

Dans la littérature, il n'existe pas de benchmark pour le POMP-T1 permettant de tester les modèles ou les approches proposées. Les travaux existants utilisent quelques instances basées sur des études de cas réel. Parmi ces dernières, celle de (Relvas et al., 2006) est la plus populaire. (Relvas et al., 2006) a proposé 3 scénarios avec une instance d'un horizon de planification de 31 jours, en se basant sur une étude de cas réel prise d'une entreprise de distribution de pétrole. Par la suite, cette étude de cas est utilisée dans les articles suivants : (Relvas et al., 2007), (Cafaro and Cerdá, 2008), (Relvas et al., 2009), (Relvas et al., 2013), (MirHassani and BeheshtiAsl, 2013), (Moradi and MirHassani, 2015), (Moradi and MirHassani, 2016), (Kirschstein, 2018). Plusieurs nouvelles instances ont été créées : (Relvas et al., 2013) ont proposé 3 instances comportant un horizon de planification différent ; (MirHassani et BeheshtiAsl, 2013) ont généré plusieurs groupes d'instances avec un horizon et un nombre de produits différents, mais qui ne sont pas accessibles.

Vu le faible nombre d'instances disponibles dans la littérature sur ce problème, nous proposons un ensemble d'instances générées à partir de l'étude de cas de (Cafaro and Cerdá, 2008) pour évaluer la performance du modèle proposé. Une étude comparative sur la difficulté des instances générées en termes de temps de résolution du modèle est également menée.

2.5.1.1 Génération des instances

Dans ce chapitre, les instances sont générées à partir de l'étude de cas de (Cafaro and Cerdá, 2008), initialement présentée par (Relvas et al., 2006). Le système étudié est composé d'un pipeline linéaire unidirectionnel d'une longueur de 147 km et d'une capacité de 18000 m^3 . Les instances sont générées selon les quatre paramètres suivants : l'horizon de planification (en jours) $T \in \{8, 14, 21, 30\}$, le nombre de produits $P \in \{4, 5, 6\}$, l'état initial des stocks de produit $IA_{p,0}$ et la demande totale des produits. Pour chaque combinaison de l'horizon de planification T et du nombre de produits P , on génère un groupe de 10 instances. Un total de 120 instances regroupées en 12 classes a été généré. L'ensemble des instances et des résultats obtenus sont disponibles au site web : <https://perso.isima.fr/~liboren/CAOR2021>.

L'état initial des stocks et la demande totale des produits d'une instance sont générés de manière aléatoire. La demande totale est la somme des demandes journalières $dem_{p,t}$ sur

l’horizon de planification, où ces dernières sont générées individuellement en utilisant un générateur aléatoire suivant une distribution uniforme. Les bornes minimale et maximale des stocks initiaux, notées respectivement $I\text{Amin}_{p,0}$ et $I\text{Amax}_{p,0}$, sont fixées à +/- 30% des valeurs de $I\text{A}_{p,0}$ utilisés dans (Cafaro and Cerdá, 2008). De la même manière, la valeur minimale et la valeur maximale de la demande journalière, notées $d\text{min}_{p,t}$ et $d\text{max}_{p,t}$ respectivement, sont définies à +/- 60% de la demande utilisée dans (Cafaro and Cerdá, 2008). Le Tableau 2.3 illustre les données utilisées pour la génération des instances, à savoir : le numéro du produit p , les volumes minimum et maximum d’un lot $V\text{min}_p$ et $V\text{max}_p$, la capacité du stock pour chaque produit $I\text{Amax}_p$ et les bornes minimale et maximale du stock initial ($I\text{Amin}_{p,0}$ et $I\text{Amax}_{p,0}$) et de la demande journalière ($d\text{min}_{p,t}$ et $d\text{max}_{p,t}$).

Tableau 2.3 : Données d’entrée relatives aux produits pour la génération d’instances

| Produit p | Volume min. du lot $V\text{min}_p$ (m^3) | Volume max. du lot $V\text{max}_p$ (m^3) | Capacité de stock $I\text{Amax}_p$ (m^3) | Niveau min. du stock $I\text{Amin}_{p,0}$ (m^3) | Niveau max. du stock $I\text{Amax}_{p,0}$ (m^3) | Demande journalière min. $d\text{min}_{p,t}$ (m^3) | Demande journalière max. $d\text{max}_{p,t}$ (m^3) |
|-------------|--|--|--|---|---|--|--|
| 1 | 17300 | 18000 | 81500 | 37000 | 68000 | 2600 | 10600 |
| 2 | 800 | 16000 | 32000 | 12000 | 23000 | 900 | 3500 |
| 3 | 800 | 16000 | 24000 | 13000 | 24000 | 200 | 800 |
| 4 | 3800 | 16000 | 27800 | 14000 | 26000 | 900 | 3600 |
| 5 | 860 | 3440 | 10320 | 7000 | 10320 | 100 | 600 |
| 6 | 4920 | 8200 | 13120 | 5000 | 10000 | 200 | 900 |

En plus des données présentées dans le tableau ci-dessus, les paramètres suivants sont utilisés : le débit moyen du pipeline est fixé à $530 m^3/h$; le temps de stabilisation est défini à $st_p = 24h$ pour chaque produit p ; le nombre maximum de lots à planifier N , et la matrice de compatibilité des produits entre deux lots successifs. Cette dernière est représentée dans le Tableau 2.4 : l’élément de la matrice $s_{p,q}$ prend la valeur 1 si la séquence des deux produits p et q est autorisée, sinon 0. Par exemple, le produit 1 peut être précédé ou suivi par les produits 2, 3 ou 4 ; tandis que seul le produit 6 peut être chargé avant ou après le produit 5. Par ailleurs, le nombre maximum de lots à planifier N est fixé selon la longueur de l’horizon de planification T avec $N = T + 3$ si $T = 30$; $N = T + 2$ si l’horizon est inférieur à 30 jours.

Tableau 2.4 : Matrice de compatibilité des produits

| | | Produit p | | | | | |
|-------------|---|-------------|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Produit p | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | 4 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| | 5 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

Vu que la plupart des modèles linéaires présentés dans la littérature utilisent des critères d'optimisation différents dans la fonction objectif, la comparaison des résultats obtenus avec ceux des articles est difficile voire impossible. C'est pourquoi, nous présentons dans la section suivante une comparaison entre les solutions fournies par le modèle proposé pour les instances générées.

2.5.2 Performance du modèle linéaire sur la base des instances générées

Le Tableau 2.5 fournit la moyenne des temps de résolution du modèle linéaire par groupe d'instances. Il est remarqué que le temps de résolution augmente de manière exponentielle en fonction de l'horizon de planification et du nombre de produits. En effet, il passe d'une moyenne de 0.9 secondes pour les instances de 8 jours à une moyenne de 12 heures (équivalent à 43194.4 secondes) pour celles de 30 jours et 6 produits. Par ailleurs, une corrélation du temps de résolution avec le nombre de produits peut être observée pour les groupes d'instances de 8, 14 et 21 jours. Dans le cas des instances de 21 jours, le groupe de 4 produits consomme une moyenne de temps plus importante que les deux autres groupes. Cela vient du fait qu'une instance dans le groupe 4 requiert un temps important de résolution. On constate qu'en plus de la longueur de l'horizon et du nombre de produit, le temps de résolution des instances dépend des demandes totales et du niveau initial des stocks.

Tableau 2.5 : Performance du modèle linéaire pour les instances générées

| Horizon de planification (jours) | Nombre de produits P | Temps de calcul (secondes) |
|----------------------------------|------------------------|----------------------------|
| 8 | 4 | 0.8 |
| | 5 | 0.9 |
| | 6 | 0.9 |
| 14 | 4 | 7.1 |
| | 5 | 11.6 |
| | 6 | 23.9 |
| 21 | 4 | 13381.5 |
| | 5 | 159.6 |
| | 6 | 267.6 |
| 30 | 4 | 11228.4 |
| | 5 | 33683.8 |
| | 6 | 43194.4 |

Le Tableau 2.6 et le Tableau 2.7 présentent les résultats pour les deux groupes d’instances de 30 jours avec 4 et 6 produits respectivement. Les résultats présentés concernent principalement les facteurs suivants : le critère d’optimisation $T1$ qui représente la maximisation du volume total transporté dans le pipeline ; le taux d’utilisation du pipeline en pourcentage durant l’horizon de planification, qui est calculé à partir du quotient entre la valeur de $T1$ sur le volume total théorique à transporter, ce dernier étant égal au débit du pipeline multiplié par 24 heures, puis par 30 jours ; le second critère d’optimisation $T2$, qui représente la minimisation du volume total contaminé, et le temps de résolution en secondes. Il est à noter que la valeur de $T2$ dépend du nombre des lots planifiés.

D’après les résultats des instances de 30 jours avec 4 produits présentés dans le Tableau 2.6, il est remarqué que toutes les valeurs du critère $T1$, à l’exception d’une seule, égalent la valeur optimale qui se traduit par un pourcentage d’utilisation du pipeline de 100%. De plus, la limite temporelle de 24 heures est atteinte pour l’instance 7, dont le critère $T1$ est inférieur à la valeur optimale. Cet écart s’explique en principe par la présence d’arrêt du pipeline dans la solution obtenue : nous observons que la résolution du modèle nécessite plus de temps de calcul pour les instances dont les solutions optimales comportent des arrêts du pipeline.

A partir du Tableau 2.7, le temps moyen de calcul augmente considérablement, et la durée moyenne de résolution est 4 fois plus importante que celle concernant le groupe de 4 produits. Nous observons que le taux d’utilisation du pipeline est de 100% pour toutes les instances avec 6 produits, et la différence entre les solutions réside dans la valeur du critère $T2$. Ce dernier varie entre 4800 et 5600, ce qui se traduit par des séquences comportant 24 à 28 lots planifiés sur 30 jours. Par ailleurs, la limite temporelle fixée à 24 heures est atteinte pour deux instances (1 et 6).

Tableau 2.6 : Résultats concernant les instances avec un horizon de 30 jours et 4 produits

| Instance | Valeur fonction objectif | Valeur T1 | Utilisation du pipeline U1 (%) | Valeur T2 | Temps de calcul (secondes) |
|------------------|--------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|----------------------------|
| 1 | 377200.0 | 381600.0 | 100% | 4400 | 191.9 |
| 2 | 376800.0 | 381600.0 | 100% | 4800 | 5432.4 |
| 3 | 377000.0 | 381600.0 | 100% | 4600 | 442.7 |
| 4 | 376800.0 | 381600.0 | 100% | 4800 | 16539.5 |
| 5 | 377000.0 | 381600.0 | 100% | 4600 | 365.1 |
| 6 | 377000.0 | 381600.0 | 100% | 4600 | 711.2 |
| 7 | 374132.7 | 379132.7 | 99.4% | 5000 | 86400.2 |
| 8 | 377200.0 | 381600.0 | 100% | 4400 | 166.5 |
| 9 | 377000.0 | 381600.0 | 100% | 4600 | 309.0 |
| 10 | 377000.0 | 381600.0 | 100% | 4600 | 1726.1 |
| Moyenne : | | | | | 11228.4 |

Tableau 2.7 : Résultats concernant les instances avec un horizon de 30 jours et 6 produits

| Instance | Valeur fonction objectif | Valeur T1 | Utilisation du pipeline U1 (%) | Valeur T2 | Temps de calcul (secondes) |
|------------------|--------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|----------------------------|
| 1 | 376400 | 381600 | 100% | 5200 | 86400.2 |
| 2 | 376800 | 381600 | 100% | 4800 | 13532.2 |
| 3 | 376400 | 381600 | 100% | 5200 | 31507.6 |
| 4 | 376400 | 381600 | 100% | 5200 | 16940.1 |
| 5 | 376000 | 381600 | 100% | 5600 | 80828.4 |
| 6 | 376000 | 381600 | 100% | 5600 | 86400.2 |
| 7 | 376400 | 381600 | 100% | 5200 | 14187.9 |
| 8 | 376400 | 381600 | 100% | 5200 | 13891.5 |
| 9 | 376200 | 381600 | 100% | 5400 | 49408.9 |
| 10 | 376000 | 381600 | 100% | 5600 | 38846.7 |
| Moyenne : | | | | | 43194.4 |

2.5.3 Exemple d'ordonnancement du pipeline « One-to-One »

Avant d'entamer la section suivante, on présente ici un exemple d'ordonnancement du pipeline « One-to-One » à partir d'une instance de 30 jours avec 6 produits (l'instance 2 du groupe 12). Le Tableau 2.8 illustre le détail de la solution donnée par le modèle, où figure la séquence des 25 lots planifiés (numérotés de 1 à 25). Il est composé des colonnes suivantes :

- Le numéro de produit du lot i se trouve dans la colonne 2 ;
- Le volume Q_i est dans la colonne 3 ;
- Les dates de début et de fin de déchargement figurent dans les deux dernières colonnes (4 et 5).

Il est remarqué que la date de début de déchargement du premier lot commence au début du jour 1 (0.0 heure), et que la date de fin de déchargement du dernier lot coïncide avec la fin de l’horizon du jour 30 (720.0 heures).

Tableau 2.8 : Exemple d’ordonnancement du pipeline « One-to-One » (instance 2 avec 30 jours et 6 produits)

| Lot i | Produit p | Taille Q_i (m^3) | Date de déchargement (h) | |
|---------|-------------|------------------------|--------------------------|-------|
| | | | Début | Fin |
| 1 | 1 | 18000.0 | 0.0 | 34.0 |
| 2 | 2 | 16000.0 | 34.0 | 64.2 |
| 3 | 1 | 18000.0 | 64.2 | 98.1 |
| 4 | 4 | 15760.0 | 98.1 | 127.8 |
| 5 | 1 | 18000.0 | 127.8 | 161.8 |
| 6 | 2 | 16000.0 | 161.8 | 192.0 |
| 7 | 1 | 17300.0 | 192.0 | 224.6 |
| 8 | 4 | 16000.0 | 224.6 | 254.8 |
| 9 | 1 | 17580.0 | 254.8 | 288.0 |
| 10 | 2 | 15489.3 | 288.0 | 317.2 |
| 11 | 1 | 17300.0 | 317.2 | 349.9 |
| 12 | 4 | 15876.0 | 349.9 | 379.8 |
| 13 | 5 | 3294.7 | 379.8 | 386.0 |
| 14 | 6 | 8200.0 | 386.0 | 401.5 |
| 15 | 5 | 3440.0 | 401.5 | 408.0 |
| 16 | 3 | 12720.0 | 408.0 | 432.0 |
| 17 | 1 | 18000.0 | 432.0 | 466.0 |
| 18 | 2 | 16000.0 | 466.0 | 496.2 |
| 19 | 1 | 18000.0 | 496.2 | 530.1 |
| 20 | 4 | 16000.0 | 530.1 | 560.3 |
| 21 | 1 | 18000.0 | 560.3 | 594.3 |
| 22 | 2 | 16000.0 | 594.3 | 624.5 |
| 23 | 1 | 17935.0 | 624.5 | 658.3 |
| 24 | 4 | 14705.0 | 658.3 | 686.0 |
| 25 | 1 | 18000.0 | 686.0 | 720.0 |

Puisqu’il n’existe pas d’arrêt du pipeline dans cette solution, alors la différence entre la date de début et de fin de déchargement donne la durée de déchargement des lots. Ceci a permis d’établir le schéma d’ordonnancement illustré par la Figure 2.10, qui nous permet de visualiser l’évolution du contenu du pipeline, après le déchargement complet de chaque lot pendant l’horizon de planification. A chaque ligne, figure les lots chargés dans le pipeline à la suite du déchargement du lot qui les précède.

A titre d’exemple, la période (0.0h-34.0h) représente la durée de déchargement du premier lot, qui comporte le produit 1 et qui possède un volume $Q_1 = 18000m^3$ égale au volume total du pipeline. A la fin de cette période (c’est-à-dire à la date 34.0h), le déchargement du premier lot se termine, qui est « poussé » par le pompage des lots deux lots suivants à la raffinerie : lot 2 avec un volume de $16000m^3$, ainsi qu’une partie (de $2000m^3$) du lot n° 3. Le pipeline doit rester plein out au long de l’horizon de planification. Après le déchargement du dernier lot planifié, un lot fictif, qui comporte un produit avec un volume de $18000m^3$, occupe le volume total du pipeline.

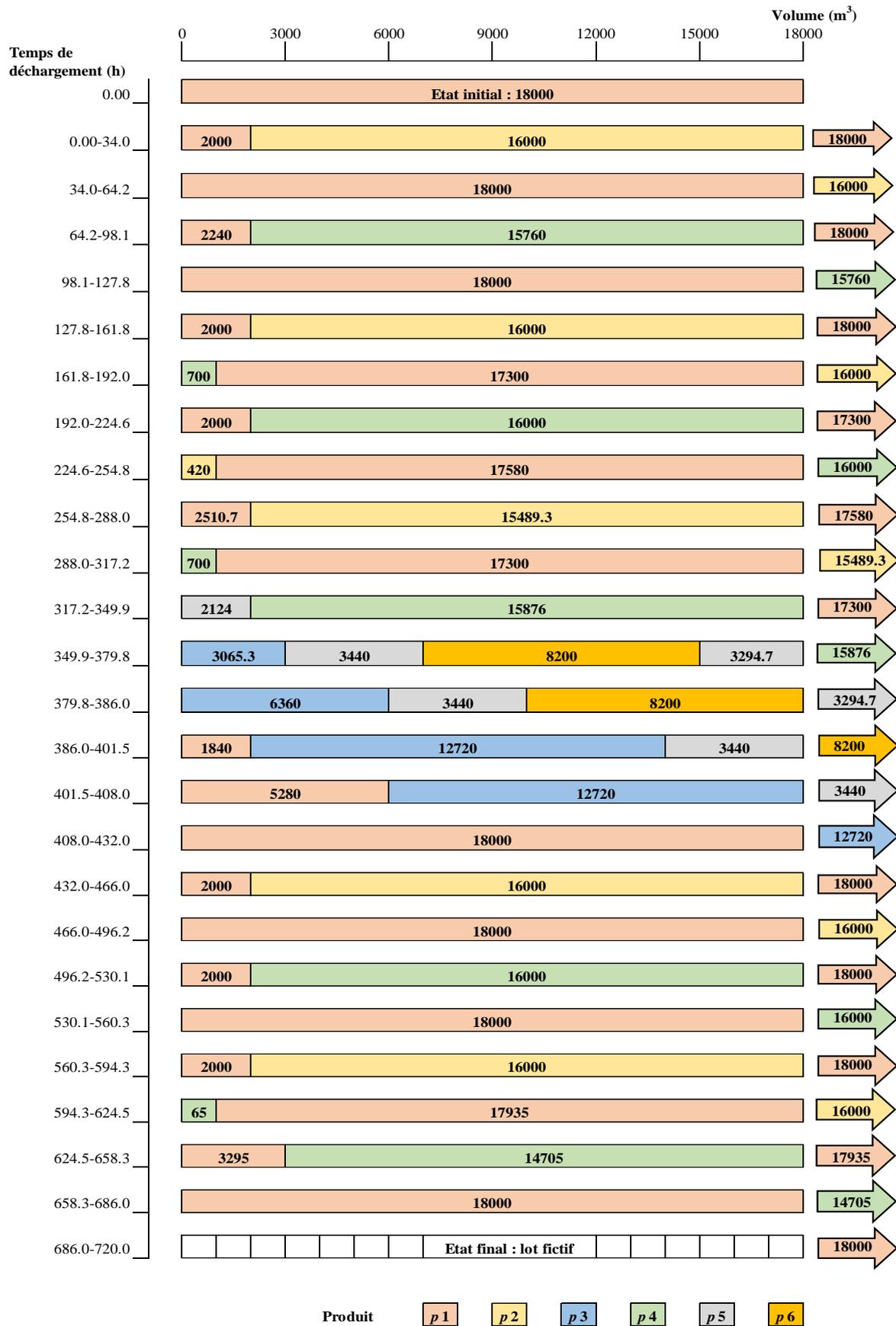


Figure 2.10 : Exemple de schéma d'ordonnancement du pipeline "One-to-One": instance 2 avec 30 jours et 6 produits

2.5.4 Analyse de sensibilité du modèle à par rapport au temps de résolution

L’analyse de sensibilité a pour objectif d’analyser la convergence du modèle proposé en fonction des instances (section 2.5.4.1), et l’impact des paramètres utilisés lors de génération d’instances sur le temps de résolution (section 2.5.4.2).

2.5.4.1 Convergence du modèle linéaire

L’analyse de la convergence se base sur l’évolution du GAP en fonction du temps durant la résolution d’une instance. Elle nous permet de comprendre l’aptitude du modèle face à différentes instances. Dans le cas d’application industrielle du modèle, une telle analyse nous facilitera le choix d’un compromis entre le temps de résolution et la qualité de solution.

L’analyse de la convergence du modèle proposé est effectuée sur trois instances de 30 jours, où la limitation temporelle de 24 heures est atteinte. Il s’agit des instances 1 et 6 du groupe de 6 produits, et l’instance 7 du groupe de 4 produits.

Le graphe représentant l’évolution du GAP en fonction du temps de calcul pour les instances difficiles est illustré par les figures suivantes : Figure 2.11, Figure 2.12 et Figure 2.13. D’après celles-ci, il est clair que les courbes représentées ne sont pas linéaires. De plus, le détail de la variation du GAP durant le temps de résolution est présenté par les trois figures respectivement pour les instances mentionnées ci-dessus.

Il est remarqué que la première solution n’est pas obtenue à la même date pour les trois instances : les trois figures montrent que, pour l’instance 6, la première solution est trouvée après 152s, soit 2 minutes et 32 secondes ; en ce qui concerne l’instance 1, la première solution n’est obtenue qu’après 8295s, ce qui est équivalent à 2 heures, 18 minutes et 15 secondes ; pour l’instance 4, le solveur linéaire permet de trouver une première solution après 48s.

Par ailleurs, à partir des trois figures, il est intéressant de remarquer que les premières solutions obtenues pour les trois instances se situent à 12.89% en moyenne de la solution optimale : concernant l’instance 6, le GAP entre la première solution et la borne inférieure s’élève à 17.60% ; pour l’instance 1, la première solution se place à 9.47% de la solution optimale ; en ce qui concerne l’instance 7, l’écart entre la première solution obtenue et la solution optimale est de 11.60%.

Cependant, le GAP diminue assez rapidement pour deux instances, où il atteint les valeurs suivantes : 1.04% après 432s (soit 7 minutes et 12 secondes) pour l’instance 6 ; 1.79% après 189s (équivalent à 3 minutes et 9 secondes) pour l’instance 7. En revanche, concernant l’instance 1, la qualité de la solution s’améliore de manière progressive, pour atteindre 0.61% en 2 heures 39 minutes et 56 secondes. Par la suite, la diminution de l’écart devient assez lente jusqu’à la fin de limite temporelle fixée à 24h, pour stagner à 0.05% pour l’instance 6, à 0.03% pour l’instance 1, et à 0.71% pour l’instance 7.

| Instance 1 (30 jours et 6 produits) | |
|--|--|
| Temps d'exécution du modèle (secondes) | GAP (%) par rapport à la solution optimale |
| 8295 | 9.47% |
| 8295 | 6.09% |
| 8339 | 3.26% |
| 8604 | 2.30% |
| 9596 | 0.61% |
| 10490 | 0.58% |
| 10614 | 0.38% |
| 10706 | 0.25% |
| 14791 | 0.17% |
| 16103 | 0.10% |
| 17666 | 0.09% |
| 20980 | 0.05% |
| 58016 | 0.04% |
| 68231 | 0.03% |

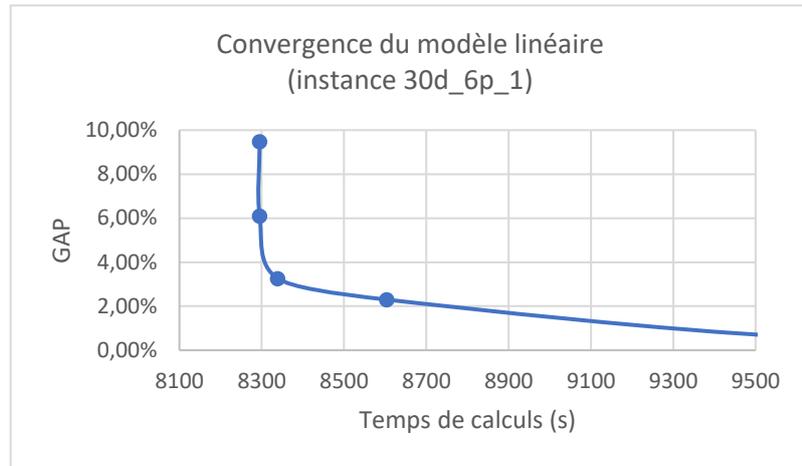


Figure 2.11 : Analyse de la convergence du modèle linéaire concernant l'instance 1 avec 30 jours et 6 produits

| Instance 6 (30 jours et 6 produits) | |
|--|-----------------------------------|
| Temps d'exécution du modèle (secondes) | GAP (%) par rapport à la solution |
| 152 | 17.60% |
| 155 | 14.10% |
| 185 | 7.72% |
| 317 | 6.19% |
| 425 | 5.93% |
| 432 | 1.04% |
| 512 | 0.51% |
| 588 | 0.17% |
| 4340 | 0.16% |
| 6124 | 0.12% |
| 7269 | 0.10% |
| 7417 | 0.09% |
| 47985 | 0.08% |
| 73211 | 0.05% |

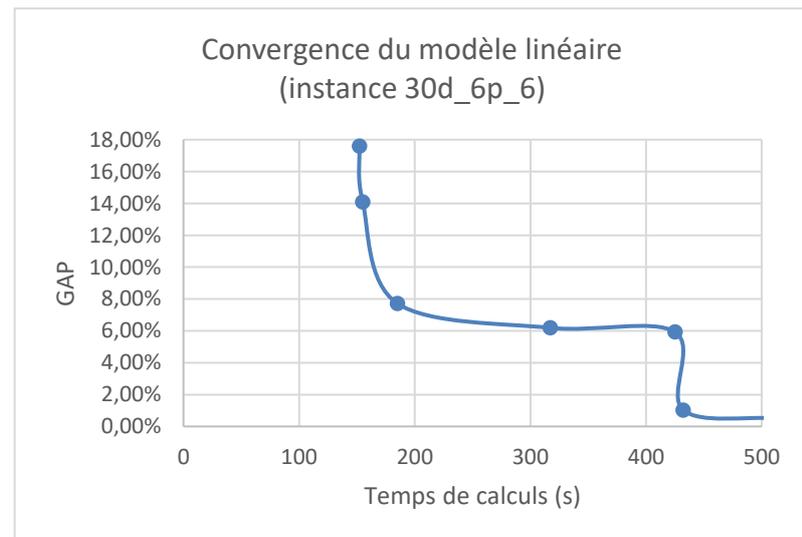


Figure 2.12 : Analyse de la convergence du modèle linéaire concernant l'instance 6 avec 30 jours et 6 produits

| Instance 7 (30 jours et 4 produits) | |
|--|-----------------------------------|
| Temps d’exécution du modèle (secondes) | GAP (%) par rapport à la solution |
| 48 | 11.60% |
| 95 | 10.10% |
| 98 | 8.40% |
| 100 | 4.66% |
| 118 | 2.92% |
| 189 | 1.79% |
| 281 | 1.64% |
| 373 | 1.46% |
| 966 | 1.04% |
| 2016 | 1.03% |
| 2388 | 0.79% |
| 14305 | 0.76% |
| 20317 | 0.73% |
| 67045 | 0.71% |

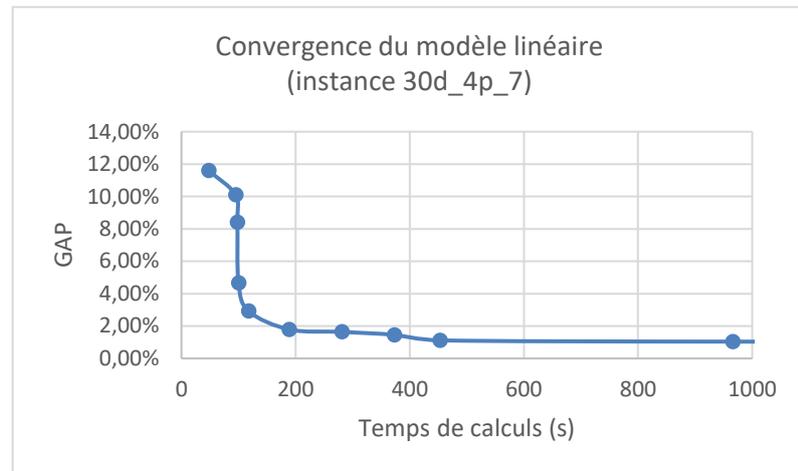


Figure 2.13 : Analyse de la convergence du modèle linéaire concernant l’instance 7 avec 30 jours et 4 produits

En somme, il est constaté, pour les trois instances ci-dessus, que le GAP évolue généralement de manière rapide jusqu’à 2% environ, avant de se rapprocher de façon lente de la solution optimale. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus pour une instance qui requiert un temps de calcul raisonnable : l’instance 2 du groupe avec un horizon de 30 jours et 4 produits.

Tout d’abord, l’évolution du GAP en fonction du temps de résolution pour l’instance 2 est représentée sous forme d’un graphe illustré par la Figure 2.14. De manière similaire aux instances précédentes, la courbe de variation de l’écart avec la solution optimale n’est pas linéaire.

Cependant, il est remarqué, d’après la Figure 2.14, que l’amélioration de la première solution s’effectue de façon plus rapide, en comparaison avec les instances ci-dessus. En effet, la première solution pour cette instance est trouvée avec un GAP inférieur à 10% (6.80% par rapport à la solution optimale) après 1 minute et 14 secondes, et s’améliore rapidement à 1.99% après 199s (soit 3 minutes et 19 secondes). Par la suite, le GAP diminue de façon lente avant d’obtenir la solution optimale (GAP=0.00%), où le temps de résolution atteint 5433s (soit 1 heure, 30 minutes et 33 secondes).

| Instance 2 (30 jours et 4 produits) | |
|--|-----------------------------------|
| Temps d'exécution du modèle (secondes) | GAP (%) par rapport à la solution |
| 84 | 6.80% |
| 90 | 3.12% |
| 93 | 2.92% |
| 130 | 2.35% |
| 199 | 1.99% |
| 399 | 0.95% |
| 418 | 0.58% |
| 607 | 0.32% |
| 763 | 0.14% |
| 841 | 0.05% |
| 1660 | 0.03% |
| 5407 | 0.01% |

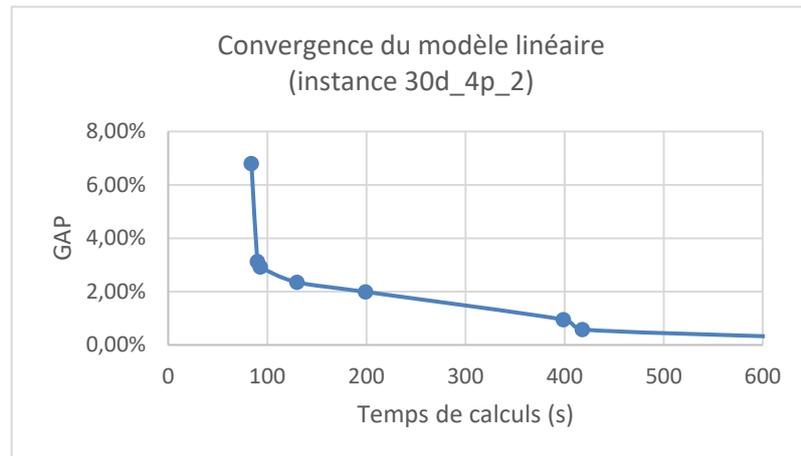


Figure 2.14 : Analyse de la convergence du modèle linéaire concernant l'instance 2 avec 30 jours et 4 produits

Ainsi, d'après les résultats présentés pour l'instance 2 avec 30 jours et 4 produits, il s'avère que le modèle linéaire permet de fournir des solutions de qualité, dont le GAP est inférieur à 2%, en un temps de calcul raisonnable, qui peut être fixé à 30 minutes. Par conséquent, le modèle peut en principe être utilisé pour étudier le problème d'ordonnement des pipelines « One-to-One » dans le cadre industriel. Cependant, en ce qui concerne certaines instances avec un horizon de 30 jours, notamment l'instance 1 (avec 6 produits) (voir Figure 2.11), le modèle pourrait ne pas trouver de première solution si la limitation temporelle de 30 minutes est considérée.

2.5.4.2 Influence des paramètres d'instance au temps de résolution

L'étude de l'influence des paramètres d'instances au temps de résolution se situe dans le cadre de l'analyse de sensibilité du modèle. Cette étude est effectuée en utilisant deux groupes d'instances de 30 jours avec respectivement 4 et de 6 produits. Parmi les 4 paramètres d'instances, on s'intéresse plus particulièrement aux deux suivants : les stocks initiaux et les demandes totales des produits.

En se basant sur la demande totale, notée $\sum_{t=1,\dots,T} \sum_{p=1,\dots,P} dem_{p,t}$, et le stock initial total, noté $\sum_{p=1,\dots,P} IA_{p,0}$, l'indicateur suivant est introduit :

- La demande nette, notée dem_nette , est égale à la différence entre la demande totale et le stock initial total ($dem_nette = \sum_{t=1,\dots,T} \sum_{p=1,\dots,P} dem_{p,t} - \sum_{p=1,\dots,P} IA_{p,0}$).

Le Tableau 2.9 et le Tableau 2.10 présentent la demande nette, indiquée par dem_nette , et le temps de résolution pour les deux groupes d'instances. Le contenu de ces deux tableaux est trié dans l'ordre croissant de la demande nette. Une corrélation entre la demande nette et le temps de résolution peut être observée sur ces deux tableaux : plus la demande nette est petite, plus le temps de résolution augmente. Il est également remarqué que les instances étudiées dans

la partie (2.5.4.1) (instances 1 et 6 avec 6 produits, et instance 7 avec 4 produits) possèdent les demandes nettes les plus petites. C’est pourquoi, elles occupent les premières lignes des deux tableaux.

De plus, la Figure 2.15 et la Figure 2.16 illustrent la courbe d’évolution du temps de calcul en fonction de la demande nette pour les deux groupes d’instances. Il est constaté qu’il existe une corrélation négative entre le temps de résolution et la demande nette : le temps de calcul augmente de manière exponentielle lorsque la demande nette se rapproche de la valeur critique dem_nette_{cr} pour les instances avec 4 produits (voir Figure 2.15), avec un coefficient de corrélation négatif et qui vaut $R_{exp} = -0.9113$; en ce qui concerne les instances comportant 6 produits (voir Figure 2.16), plus la demande nette tend vers sa valeur critique, plus le temps de résolution s’accroît de manière linéaire, où le coefficient de corrélation est négatif et égale à $R_l = -0.8262$.

Pour les instances ayant une demande nette qui se rapproche de la valeur critique, elles possèdent une grande la possibilité d’avoir une saturation des stocks pendant l’horizon de planification, ce qui engendre des arrêts du pipeline. Puisque le modèle linéaire tend à chercher la solution optimale qui permet de satisfaire la totalité de la demande, sans aucun temps d’arrêt du pipeline, il nécessite plus de temps de calcul pour ces instances.

Tableau 2.9 : dem_nette et temps de calcul pour les instances avec 30 jours et 4 produits

| Instance | Demande nette (m^3) | Temps de calcul (s) |
|----------|-------------------------|---------------------|
| 7 | 220420 | 86400.2 |
| 4 | 224290 | 16539.5 |
| 2 | 228220 | 5432.4 |
| 10 | 238990 | 1726.1 |
| 3 | 241900 | 442.7 |
| 5 | 244360 | 365.1 |
| 6 | 246770 | 711.2 |
| 9 | 248440 | 309.0 |
| 1 | 260210 | 191.9 |
| 8 | 268410 | 166.5 |

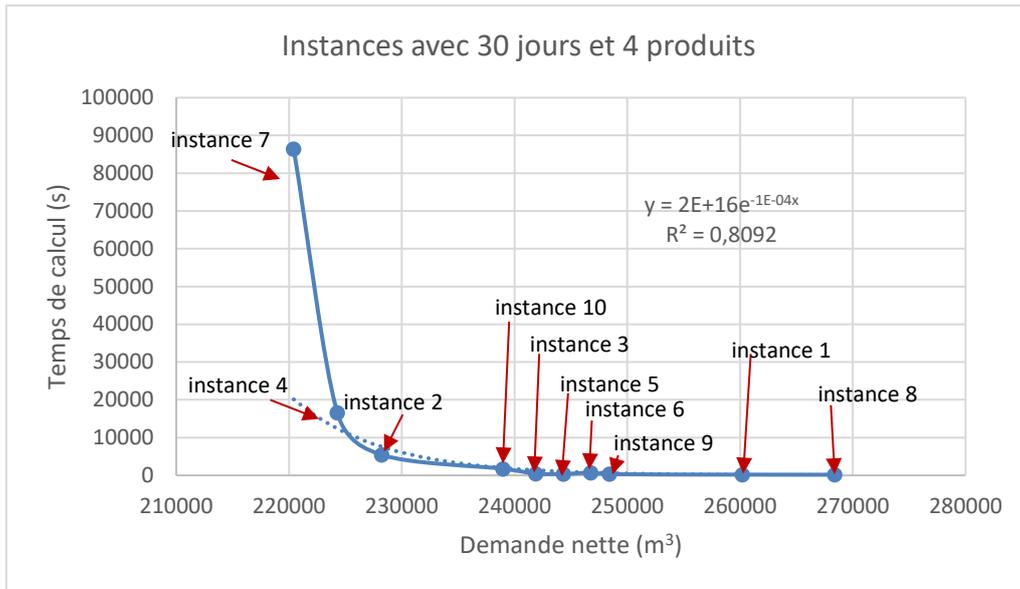


Figure 2.15 : Evolution du temps de résolution en fonction de la demande nette pour les instances avec 30 jours et 4 produits

Tableau 2.10 : *dem_net* et temps de calcul pour les instances avec 30 jours et 6 produits

| Instance | Demande nette (m³) | Temps de calcul (s) |
|----------|--------------------|---------------------|
| 1 | 221080 | 86400.2 |
| 6 | 222280 | 86400.2 |
| 5 | 234880 | 80828.4 |
| 10 | 236930 | 38846.7 |
| 4 | 249440 | 16940.1 |
| 9 | 250760 | 49408.9 |
| 8 | 253060 | 13891.5 |
| 7 | 267840 | 14187.9 |
| 3 | 274920 | 31507.6 |
| 2 | 276080 | 13532.2 |

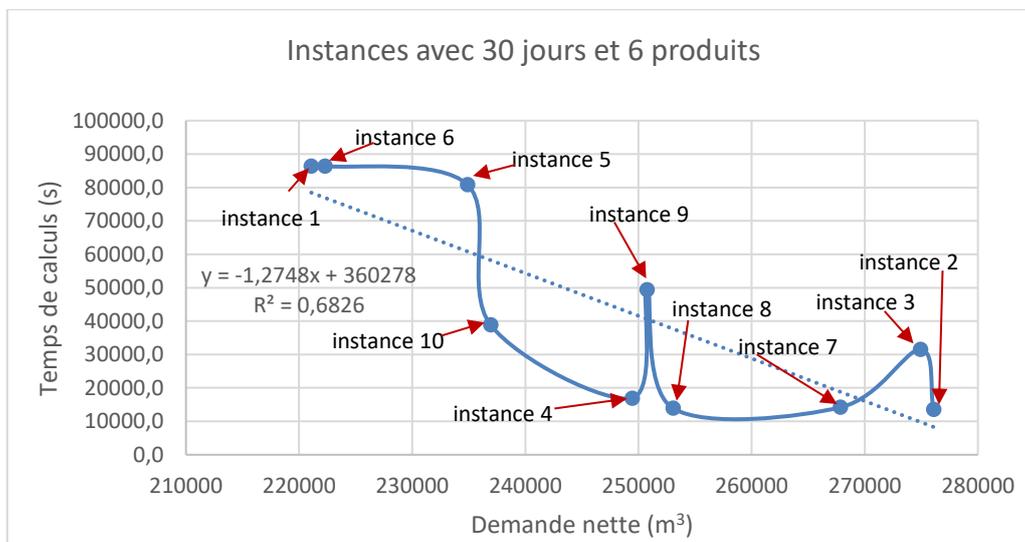


Figure 2.16 : Evolution du temps de résolution en fonction de la demande nette pour les instances avec 30 jours et 6 produits

Ainsi, une seconde analyse est effectuée sur la base de nouvelles instances créées, qui soutient la première étude, menée pour les instances de 30 jours, par rapport à la difficulté d’obtenir des solutions de qualité par le modèle en un temps de résolution raisonnable. Un total de neuf instances comprenant un horizon de planification de 30 jours est considéré pour cette étude. Elles sont réparties sur trois classes selon le nombre de produits considéré : 4, 5 ou 6, comme le montre le Tableau 2.11. De plus, d’après celui-ci, les instances créées possèdent des demandes nettes qui sont inférieures à la valeur critique $dem_{nette_{cr}} = 220000m^3$.

D’après le Tableau 2.11, on remarque que la limite temporelle imposée de 24 heures est dépassée pour toutes les instances étudiées, sans parvenir à trouver la solution optimale. De plus, plus de la moitié de ces instances ne possèdent pas des solutions de qualité, avec un GAP supérieur à 2%.

Tableau 2.11 : Résultats concernant le temps de calcul pour les nouvelles instances créées de 30 jours

| Instance | Nombre de produits P | Demande nette (m^3) | Temps de calcul (s) | GAP(%) par rapport à la solution |
|----------|------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------------------|
| 1 | 4 | 214110 | 86400.1 | 2.44% |
| 2 | 4 | 216220 | 86403.2 | 1.83% |
| 3 | 4 | 212900 | 86403.4 | 2.81% |
| 4 | 5 | 211630 | 86404.1 | 0.89% |
| 5 | 5 | 202330 | 86402.0 | 4.66% |
| 6 | 5 | 201520 | 86404.4 | 4.74% |
| 7 | 6 | 202150 | 86401.8 | 0.75% |
| 8 | 6 | 201780 | 86404.4 | 2.06% |
| 9 | 6 | 201220 | 86405.6 | 1.89% |

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre décrit, nous abordons le problème d’ordonnancement des pipelines multiproduits de type « One-to-One » (POPM-T1) dans le contexte de l’industrie pétrolière. Nous proposons un modèle linéaire se basant sur l’axe de temps de déchargement. Le modèle prend en compte des contraintes relatives à la gestion de stock à la destination, qui se trouve en aval du pipeline, et des contraintes spécifiques au domaine pétrolier, notamment la compatibilité des produits et le temps de stabilisation des produits. La fonction objectif du modèle considère deux critères d’optimisation opérationnels, à savoir la maximisation du volume total des produits transportés par pipeline et la minimisation du volume total contaminé entre les lots successifs. Ces deux critères d’optimisation sont parmi les critères les plus utilisés par les travaux étudiés, qui combinent dans leurs fonctions objectifs entre plusieurs critères considérés, opérationnels ou économiques. Cette diversification des critères d’optimisation rend la comparaison entre les résultats des travaux difficile.

Les études numériques présentées dans ce chapitre se basent sur un ensemble de 120 instances générées à partir d'un cas réel de (Cafaro and Cerdá, 2008). Ces instances se répartissent en 12 groupes selon la longueur de l'horizon de planification et le nombre de produits. Les résultats obtenus montrent que le modèle linéaire permet de fournir des solutions optimales en un temps de calcul raisonnable pour les instances de 8, 14 et 21 jours. De plus, une analyse de convergence du modèle est effectuée, et qui prouve que celui-ci permet d'obtenir des solutions de qualité (avec un GAP par rapport à la solution optimale inférieur à 2%) pour certaines instances en un temps de résolution raisonnable, ce qui rend le modèle applicable dans le contexte industriel pour ces d'instances. Cependant, le modèle proposé ne parvient pas à trouver rapidement une première solution pour quelques instances avec un horizon d'un mois. Par ailleurs, l'étude de sensibilité du modèle montre qu'une instance devient difficile à résoudre lors que la différence entre la demande totale et le stock initial franchit un seuil. De ce fait, une méthode approchée est nécessaire pour la résolution efficace de ces instances, et que nous proposons au chapitre suivant.

Chapitre 3

Problème d'ordonnancement de Pipelines Multiproduits de type « One-to-One » : résolution approchée

Sommaire

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.1 | Introduction..... | 85 |
| 3.2 | Présentation du GRASP-like proposé..... | 86 |
| 3.2.1 | Méthode de construction..... | 87 |
| 3.2.2 | Fonction d'évaluation..... | 92 |
| 3.2.3 | Procédure d'amélioration..... | 93 |
| 3.2.4 | Exemple numérique..... | 103 |
| 3.3 | Expérimentations numériques..... | 126 |
| 3.3.1 | Divergence et convergence du GRASP-like proposé..... | 126 |
| 3.3.2 | Configuration de la procédure d'amélioration locale..... | 127 |
| 3.3.3 | Performance de la procédure d'amélioration locale..... | 129 |
| 3.3.4 | Performance de la méthode approchée..... | 129 |
| 3.4 | Conclusion..... | 134 |

3.1 Introduction

Ce chapitre porte sur la résolution approchée du Problème d'Ordonnancement de Pipeline Multiproduit de type « One-to-One », noté (POPM-T1), étudié dans le domaine de l'industrie pétrolière. De manière similaire à la méthode exacte présentée au chapitre 2, la méthode approchée proposée dans ce chapitre peut être adaptée pour le problème d'ordonnancement du réseau de pipelines OCP, dans le contexte de l'industrie minière.

Dans le POPM-T1, le système considéré se compose d'un pipeline linéaire qui transporte des produits pétroliers d'une seule source, appelée raffinerie, jusqu'à une destination, nommée centre de distribution. L'objectif est de définir un ordonnancement des lots à transporter via le pipeline, en prenant en compte la capacité des stocks au centre de distribution pour garantir la satisfaction de toutes les demandes sur l'horizon de planification, tout en maximisant le volume total transporté.

Dans le but d'étudier ce problème, nous proposons une méthode approchée pour la résolution du POPM-T1. Cette méthode approchée comporte deux composants principaux : une heuristique de construction et une méthode d'amélioration. L'heuristique de construction

permet de créer une solution initiale de façon randomisée. Une solution est sous forme qu'une séquence de lots, où chaque lot contient un produit, un volume et des dates de chargement et de déchargement. Une procédure de réparation est utilisée pour garantir l'obtention d'une séquence réalisable. La méthode d'amélioration locale est appliquée par la suite pour optimiser le volume des lots. Une itération de la méthode approchée fournit une solution générée puis améliorée. Par conséquent, si l'on réalise α exécutions de la méthode approchée, celle-ci se comporte comme un GRASP-like : elle fournit la meilleure solution parmi les α solutions obtenues. Ainsi, le GRASP-like est évalué sur l'ensemble des instances générées dans le chapitre 2. Le résultat obtenu est comparé à celui du modèle linéaire.

Ce chapitre est organisé comme suit : la section (3.2) détaille le GRASP-like proposé avec un exemple numérique ; la section (3.3) porte sur les résultats des expérimentations numériques fournis par l'algorithme proposé, en comparaison avec le modèle linéaire présenté dans le chapitre 2 ; et la section (3.4) présente la conclusion du chapitre.

3.2 Présentation du GRASP-like proposé

Le GRASP-like proposé est composé d'une méthode de construction (section 3.2.1), d'une fonction d'évaluation (section 3.2.2) et d'une amélioration locale (section 3.2.3) comme illustré dans la Figure 3.1. Cette méthode approchée a fait l'objet d'une publication à la conférence internationale (ILS) « International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain » en 2020 (Bamoumen et al., 2020) .La méthode de construction est une heuristique gloutonne randomisée qui cherche à créer une solution initiale de manière itérative. Une solution initiale est codée en tant qu'une séquence de lots. A chaque itération, un lot (avec le numéro de produit et le volume) est identifié pour l'insertion dans la séquence. La fonction d'évaluation vérifie la satisfaction des demandes et calcule les coûts associés à chaque insertion de lot. Dans le cas de rupture de stock d'un produit, un processus de réparation est déclenché, qui cherche à remplacer les derniers lots par une autre combinaison de produits permettant d'éviter la rupture. Lorsque l'horizon de planification est atteint, le processus de construction s'arrête et la solution initiale construite est renvoyée.

La procédure d'amélioration locale est appliquée afin d'améliorer la qualité de la solution initiale obtenue. Elle cherche à maximiser le volume total des lots sans modifier la séquence de produits. Plusieurs méthodes d'amélioration locale sont proposées.

A l'aide d'un critère de randomisation, la méthode approchée est comparée à un GRASP-like : elle permet de générer plusieurs solutions en répétant les deux étapes ci-dessus, selon un nombre d'itérations fixé. La meilleure solution obtenue est considérée comme résultat final.

Dans cette section, nous décrivons successivement l'heuristique de construction, la fonction d'évaluation ainsi que l'amélioration locale proposée, avant de présenter un exemple numérique.

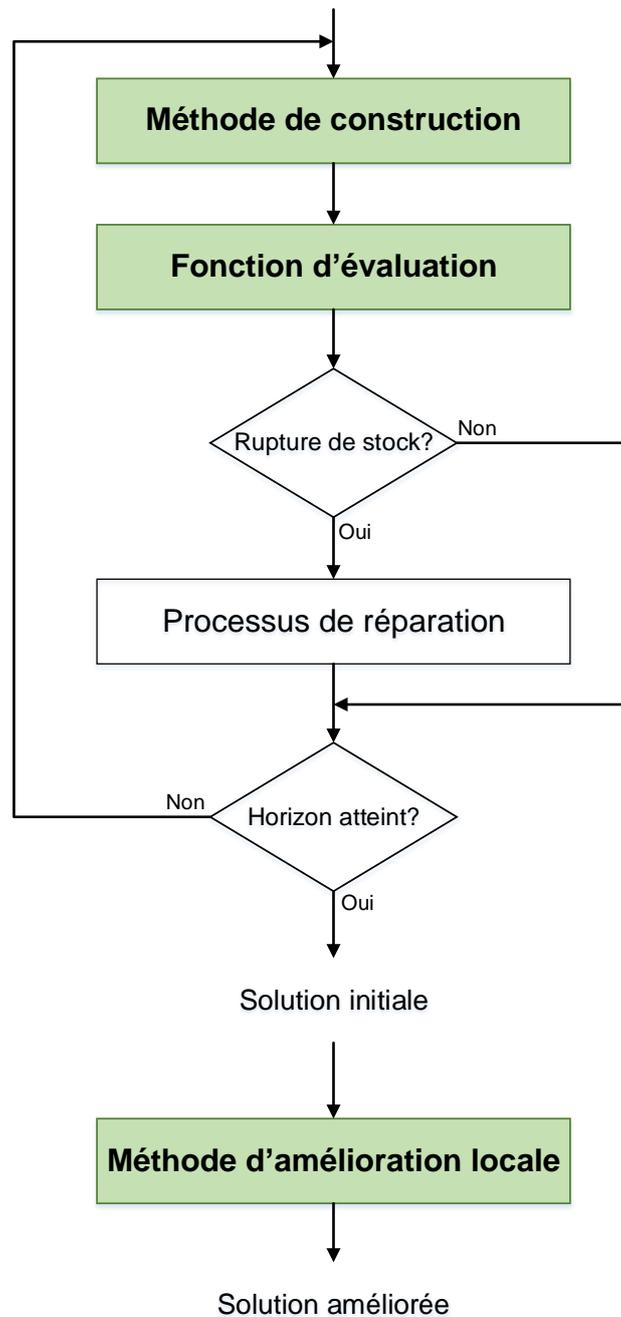


Figure 3.1 : Schéma de la méthode approchée proposée

3.2.1 Méthode de construction

Nous utilisons une heuristique gloutonne randomisée pour la construction de solutions initiales. Une solution initiale est codée en tant qu’une séquence de lots, chacun de ces derniers comportant un seul produit et possédant un volume compris entre deux bornes supérieure et inférieure en fonction du produit. L’heuristique de construction crée une solution de manière itérative. A chaque itération, une liste de produits est sélectionnée et insérée dans la séquence.

La séquence est évaluée après l'insertion. En cas de rupture de stock d'un produit durant la construction, une procédure de réparation sera lancée. L'objectif est d'obtenir une solution réalisable qui comporte des lots ayant le volume le plus maximum possible.

3.2.1.1 Algorithme de l'heuristique de construction

Le principe de l'heuristique de construction est décrit dans Algorithme 1. L'algorithme prend comme paramètre d'entrée une instance du problème qui est composée des éléments suivants :

- Paramètres liés au pipeline : le débit du pipeline, la longueur du pipeline, la capacité de stockage, le volume minimum/maximum d'un lot selon le produit qu'il contient, etc.
- Time_horizon : l'horizon temporel de planification (en heures) ;
- List_product : la liste de produits ;
- List_demand : la liste de demande journalière des produits ;
- Compatibility_matrix : la matrice de compatibilité entre chaque paire de produits.

La phase d'initialisation (lignes 12 à 16) commence par la création d'un ensemble de structures arborescentes à partir de la matrice de compatibilité, un arbre étant établi par produit. Les structures arborescentes seront utilisées afin d'identifier la liste des produits aux étapes 2 (ligne 28) et 5 (ligne 42) de la boucle principale. Une séquence peut être initialisée comme un ensemble vide ou un ensemble qui comporte un ou plusieurs lots chargés dans le pipeline (ligne 15). Chaque lot i initialisé dans la séquence de départ comporte un produit Num_{p_i} et un volume Vol_i . La fonction d'évaluation consiste à calculer les variables d'environnement suivantes :

- Current_time : la date (en heures) après le déchargement de tous les lots de la séquence courante ;
- Product_daily_total_storage : la matrice du niveau de stockage total des produits à la fin de chaque jour de l'horizon de planification au centre de distribution ;
- Product_daily_after_settling_storage : la matrice du niveau de stock des produits prêts à être livrés aux clients après la période de stabilisation pour chaque jour de l'horizon de planification ;
- Out_of_stock : l'existence de rupture de stock d'un produit durant le déchargement de la séquence de lots ;
- Start_discharging_time : la liste des dates de début de déchargement des lots ;
- Ending_discharging_time : la liste des dates de fin de déchargement des lots.

La fonction d'évaluation est appelée pour initialiser toutes les variables ci-dessus, en plus de la valeur de la fonction objectif.

La boucle principale (lignes 18 à 44) consiste à construire la solution de manière itérative. Chaque itération est composée de cinq étapes décrites ci-dessous :

- **Étape 1** - sélection d’un produit (lignes 20 à 25) :

Dans cette étape, une liste de candidats restreints « Restricted Candidate List » (RCL) est construite selon l’autonomie des produits au centre de distribution. L’autonomie des produits est estimée en divisant le niveau actuel de chaque stock par la demande quotidienne correspondante. Le niveau des stocks actuel est donné par la fonction d’évaluation. Afin d’augmenter la probabilité de générer une séquence des lots réalisable, les produits ayant une autonomie inférieure à un seuil fixé sont sélectionnés. Cette procédure est encapsulée dans la fonction **create_RCL_list**. Si la liste (RCL) est renvoyée vide, alors le processus de réparation, introduit dans l’étape 5 de la boucle principale, est lancé. Dans le cas où la liste (RCL) comporte plusieurs produits, alors un produit y est sélectionné de manière aléatoire pour la création d’un nouveau lot.

- **Étape 2** - vérification de compatibilité (ligne 28) :

Afin d’éviter la contamination des produits, il est nécessaire de vérifier la compatibilité entre le produit sélectionné et celui qui le précède dans la séquence en cours de construction. Dans le cas de non-compatibilité entre ces deux produits, on doit chercher un chemin entre eux en incluant plusieurs produits intermédiaires afin de respecter la contrainte de compatibilité. La recherche d’un tel chemin s’effectue sur une structure arborescente qui est construite à partir de la matrice de compatibilité. Une telle procédure est détaillée dans la fonction **identify_a_path_to_Prod**. Une liste contenant des produits intermédiaires et le produit sélectionné à l’étape précédente sera renvoyée. Dans le cas où le produit sélectionné à l’étape 1 est compatible avec celui qui le précède dans la séquence, alors la liste ne contient que le produit sélectionné.

- **Étape 3** - insertion de nouveau(x) lot(s) (lignes 31 à 35) :

La liste des produits est codée sous-forme d’une chaîne de caractère et stockée dans la liste associée au dernier lot dans la séquence actuelle. Dans le cas où la liste des produits, déterminée à l’étape précédente, comporte un seul produit, alors un lot contenant celui-ci est créé avec le volume maximum possible, compte tenu du niveau de stock actuel correspondant et de sa capacité de stockage au centre de distribution. Dans le cas où la liste des produits contient plusieurs produits (produits intermédiaires et produit sélectionné), alors pour un lot est créé pour chacun de ceux-ci : pour les lots comportant les produits intermédiaires, leur volume est déterminé de façon qu’il soit le minimum possible, afin d’éviter la rupture de stock du produit sélectionné ; tandis que pour le lot contenant le produit sélectionné, son volume est maximisé. Le calcul du volume des lots et la création des lots sont réalisées respectivement par les

fonctions **define_batch_volume** et **create_new_batch**. Par la suite, tous les nouveaux lots sont insérés dans la séquence actuelle de manière itérative.

- **Etape 4** - vérification (lignes 38 à 40) :

Après l'insertion de tous les nouveaux lots, la fonction d'évaluation est appliquée sur la séquence actuelle en se basant sur la politique d'évaluation au plus tôt. De plus, la date actuelle est déterminée sur la base de la durée totale de déchargement des lots. Cette dernière est évaluée à partir du volume des lots et de la durée d'arrêt du pipeline, dans le cas où la saturation de la capacité de stockage s'est produite pour le produit contenu dans lot en cours de déchargement. Par ailleurs, la satisfaction de la demande journalière de chaque produit est examinée. En effet, pour chaque produit, le stock total, noté « Product_daily_total_storage », et le stock après le temps de stabilisation, noté « Product_daily_after_settling_storage », sont déterminés à la fin de chaque jour de l'horizon de planification. Le détail de la fonction d'évaluation est présenté dans la section suivante.

- **Etape 5** - réparation (ligne 42) :

En cas d'infaisabilité, une procédure de réparation, assurée par la fonction **repair_process**, est lancée pour trouver un cheminement alternatif en exploitant les structures arborescentes. Une liste est associée à chaque lot dans la séquence courante pour éviter des recherches répétitives. La procédure de réparation est détaillée dans la section suivante.

La boucle principale est interrompue si l'horizon de planification est atteint. L'heuristique de construction renvoie la séquence de lots. En effet, lorsqu'un nouveau produit est choisi et son volume est déterminé, on vérifie si la somme de sa durée de déchargement et de la date courante est inférieure ou supérieure à l'horizon:

- S'il s'agit du premier cas (inférieur), le nouveau lot est inséré dans la solution courante, et cette dernière est évaluée au plus tôt pour mettre à jour le niveau des stocks et la date courante;
- S'il s'agit du second cas (supérieur), alors on vérifie si l'on peut décharger le nouveau lot pendant la période comprise entre la date courante et l'horizon. Cette durée est convertie en volume, en la multipliant par le débit du pipeline. Si ce nouveau volume est compris entre la borne minimale et maximale, selon le produit choisi, alors le nouveau lot est inséré dans la solution courante, puis celle-ci est évaluée au plus tôt, et à l'itération suivante, le processus de construction est arrêté et la solution est renvoyée, vu que l'on atteint la fin de l'horizon de planification. Par contre, si le nouveau volume est inférieur à la borne minimale, alors le nouveau lot est supprimé, le processus de construction est arrêté et la solution est renvoyée. La durée comprise entre la date courante (qui est la date de fin de déchargement du dernier lot) et l'horizon est considérée

dans ce cas comme un temps d'arrêt du pipeline. La solution initiale comprend les lots avec des dates de déchargement au plus tôt.

Algorithme 1: Heuristique de construction

```

1.  Entrée
2.  Instance: une instance est principalement composée des éléments suivants :
3.  .Paramètres relatifs au pipeline
4.  .Time_horizon: l’horizon de planification
5.  .List_product: la liste des numéros de produits
6.  .List_demand: la liste de demande des produits
7.  .Compability_maxtrix: la matrice de compatibilité des produits
8.  Sortie
9.  Sequence : une séquence des lots
10. Début
11. //initialisation
12. Pour chaque Num_p dans Instance.List_product Faire
13.   Tree_struct[Num_p] <- create_a_tree(Instance, Compability_matrix, Num_p)
14. Fin Pour
15. Sequence <- {} ou {(Num_p1,Vol1), (Num_p2, Vol2)...}
16. Sol <- evaluation_fonction(Sequence, Instance, forward)
17.
18. Tant que Sol.Current_time < instance.Time_horizon Faire
19.   //Etape 1. Sélectionner un produit de la liste RCL
20.   RCL_list <- create_RCL_list(Sol, Instance.List_demand)
21.   Si RCL_list est vide Alors
22.     // Etape 5. Lancer le processus de réparation
23.     {Sequence, Sol} <- repair_process(Sequence, Sol, Instance, Tree_struct)
24.   Fin Si
25.   Prod_dest <- choisir aléatoirement un produit de la liste RCL_list
26.
27.   //Etape 2. Identifier la liste de produit(s)
28.   List_prod <- identify_a_path_to_Prod(Sol, Prod_dest, Tree_struct)
29.
30.   //Etape 3. Créer et insérer le(s) nouveau(x) lot(s)
31.   Pour chaque Num_p dans List_prod
32.     Volume <- define_batch_volume(Sol, Volume_max, Num_p)
33.     Batch <- create_new_batch(Num_p, Volume)
34.     Sequence <- Sequence U Batch
35.   Fin Pour
36.
37.   //Etape 4. Evaluer une séquence
38.   Sol <- evaluation_fonction(Instance, Sequence, forward)
39.
40.   Si une rupture de stock existe dans Sol Alors
41.     //Etape 5. Lancer le processus de réparation
42.     {Sequence, Sol} <- repair_process(Sequence, Sol, Instance, Tree_struct)
43.   Fin Si
44. Fin Tant que
45. Retourner Sequence
46. Fin

```

3.2.1.2 Procédure de réparation

Comme illustré par l’Algorithme 2, le processus de réparation répète des opérations de retrait et réinsertion des lots de manière itérative : à chaque itération, on cherche d’abord à identifier le produit en rupture (ligne 11) avant de retirer successivement le dernier lot de la séquence actuelle jusqu’à ce qu’il n’y ait plus de rupture (lignes 14 à 24). L’objectif est d’insérer

un lot en partant du produit identifié. Pour ce faire, après avoir retiré un lot, on vérifie s'il existe un chemin non parcouru sur l'arbre partant du produit du dernier lot au produit en rupture identifié (ligne 18). Tous les chemins parcourus sont stockés dans la liste associée au dernier lot de la séquence. On utilise la même procédure que l'étape 2 de l'Algorithme 1.

Pour chaque produit dans la liste de chemin trouvé, un lot est créé et inséré dans la séquence (lignes 26 à 31). La réinsertion de lots est similaire à l'étape 3 de l'Algorithme 1. existent des lots intermédiaires à insérer. Après la réinsertion, la séquence est évaluée (ligne 34). Les opérations de retrait et de réinsertion sont répétées jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de rupture de stock. Ainsi, la séquence actuelle et la solution évaluée sont renvoyées à la fin de l'algorithme.

Algorithme 2: Processus de réparation

```
1. Entrée
2.   Sequence: une séquence de lots
3.   Sol: une solution évaluée
4.   Instance: une instance
5.   Tree_struct: un ensemble de structures arborescente
6. Sortie
7.   Sequence: une séquence de lots
8.   Sol: une solution évaluée
9. Début
10.  Tant qu'une rupture de stock existe dans Sol Faire
11.    Prod_dest <- identifier le numéro du produit qui est en rupture de stock dans Sol
12.
13.    //Retirer le(s) dernier(s) lot(s) de la séquence
14.    Faire
15.      Retirer le dernier lot de Sequence
16.      Sol <- evaluation_fonction(Instance, Sequence, forward)
17.
18.      List_prod <- identify_a_path_to_Prod(Sol, Prod_dest, Tree_struct)
19.
20.      Stop <- vrai
21.      Si une rupture de stock existe dans Sol Ou List_prod est vide Alors
22.        Stop <- faux
23.      Fin si
24.    Tant que Stop = faux
25.
26.    //Créer et insérer le(s) nouveau(x) lot(s)
27.    Pour chaque Num_p dans List_prod
28.      Volume <- define_batch_volume(Sol, Volume_max, Num_p)
29.      Batch <- create_new_batch(Num_p, Volume)
30.      Sequence <- Sequence U Batch
31.    Fin Pour
32.
33.    //Evaluer une séquence
34.    Sol <- evaluation_fonction(Instance, Sequence, forward)
35.  Fin Tant que
36.  Retourner {Sequence, Sol}
37. Fin
```

3.2.2 Fonction d'évaluation

L'évaluation d'une séquence de lots consiste à déterminer les dates de début et de fin de déchargement correspondantes pour chaque lot, à mettre à jour les niveaux de stock de chaque produit au centre de distribution, à calculer la valeur de la fonction objectif et à vérifier la

faisabilité de la solution obtenue. Deux politiques d’évaluation peuvent être adoptées comme suit :

- Déchargement au plus tôt : elle consiste à décharger les lots dès que possible et à mettre à jour les niveaux de stock ;
- Déchargement au plus tard : elle pousse le déchargement des lots au plus tard, compte tenu des niveaux de stock et du respect de la satisfaction de la demande.

L’application de la politique de déchargement au plus tôt permet de démarrer le déchargement des lots au début de l’horizon de planification, avec la possibilité d’obtenir un temps libre à la fin de la planification. Une telle stratégie facilite l’insertion de nouveaux lots dans la séquence puisqu’il est uniquement nécessaire d’évaluer le nouveau lot inséré à partir de la dernière évaluation, d’autant plus que le temps disponible n’est pas difficile à quantifier. L’évaluation des lots récemment insérés n’a pas d’impact sur les lots précédents, puisque cette évaluation s’effectue dans l’ordre chronologique. C’est la raison pour laquelle la politique de déchargement au plus tôt est bien adaptée à la phase de construction. À la fin de cette phase, le déchargement du dernier lot dans la séquence obtenue pourrait atteindre la fin de l’horizon de planification.

La politique de déchargement au plus tard ne peut être exécutée qu’après avoir appliqué la politique précédente. À partir de la séquence évaluée, l’évaluation au plus tard sélectionne les lots un par un, dans l’ordre chronologique descendant, et déplace la date de déchargement aussi tard que possible. Il est important de noter que cette politique ne modifie pas le taux de remplissage du pipeline par rapport à la précédente. Elle permet de donner le temps de déchargement au plus tard pour chaque lot. Par conséquent, dans la solution obtenue, une fenêtre de temps est fournie pour chaque lot, en combinant la date de déchargement au plus tôt et celle au plus tard. Les bornes inférieure et supérieure d’une fenêtre de temps permettent de déterminer le volume total à augmenter ou à diminuer. Cela facilitera par la suite l’optimisation du volume des lots. Ainsi, la politique de déchargement au plus tard est bien adaptée pour les procédures basées sur l’ajustement du volume dans la phase d’amélioration.

3.2.3 Procédure d’amélioration

La procédure d’amélioration proposée cherche à maximiser le taux de remplissage du pipeline sans modifier la séquence des lots. La diversification de la séquence des produits est n’est gérée que par l’heuristique de construction. La maximisation du taux de remplissage du pipeline est réalisée en maximisant le volume des lots de la séquence. La Figure 3.2 illustre le volume de chaque lot, qui est compris entre deux volumes minimum et maximum, selon le produit qu’il comporte. De plus, deux opérations peuvent être effectuées sur le volume d’un lot : soit une augmentation pour atteindre le volume maximum, en ajoutant le volume résiduel ;

soit une réduction, en retranchant le volume à réduire, afin d'obtenir le volume minimum. Ces opérations sont réalisées par la procédure d'amélioration.

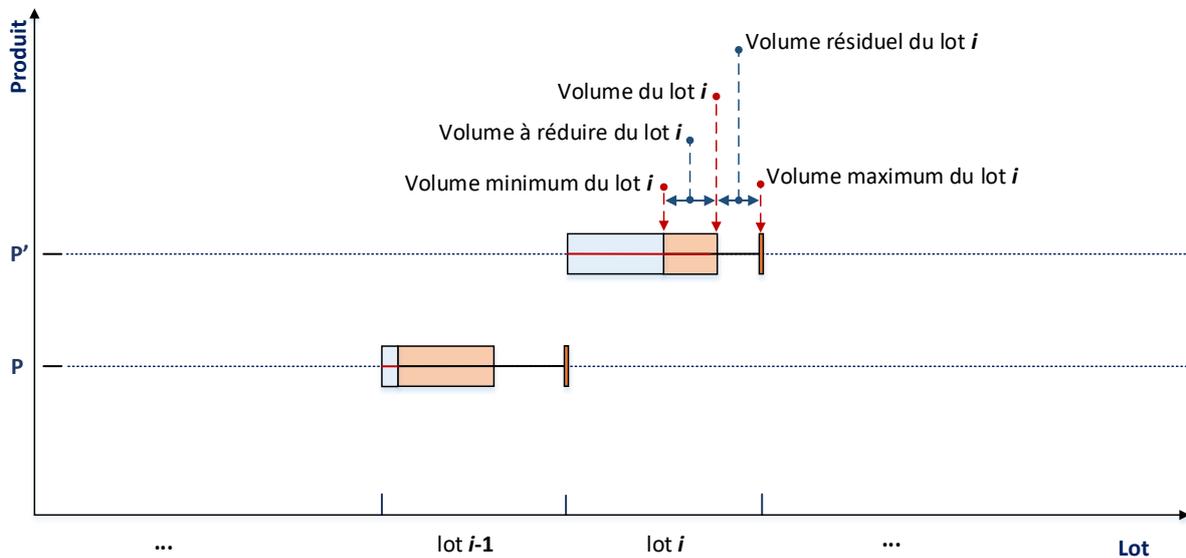


Figure 3.2 : Représentation du volume des lots

Comme représenté dans la Figure 3.3, la procédure d'amélioration est composée de trois méthodes d'ajustement de volumes. A la première itération, les trois méthodes sont appliquées successivement ; et seules les deux dernières sont exécutées à partir de la seconde itération. La procédure d'amélioration s'arrête quand l'une des deux conditions suivantes est remplie : pas d'amélioration durant la dernière itération ou le nombre d'itérations α est atteint. Ainsi, la meilleure solution obtenue est renvoyée. La suite de cette section s'intéresse à la présentation du détail des trois méthodes d'amélioration.

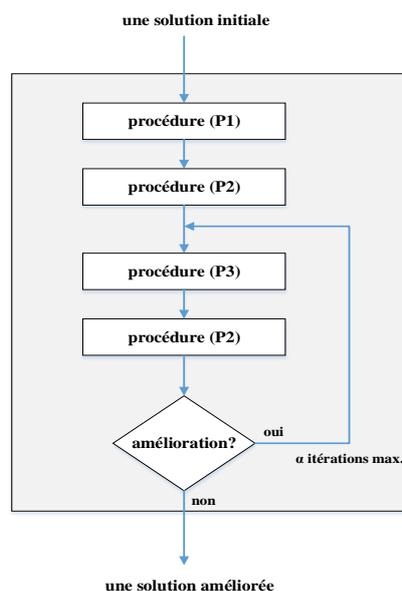


Figure 3.3 : Procédure d'amélioration locale

3.2.3.1 Première méthode d’amélioration

La première méthode d’amélioration, notée (P1), vise à augmenter le taux de remplissage du pipeline en réduisant les durées d’arrêt du pipeline. Il utilise une stratégie de recherche bidirectionnelle qui s’effectue en deux étapes comme suit :

- La première étape consiste à minimiser les temps d’arrêt du pipeline. En considérant la séquence évaluée avec la stratégie d’évaluation au plus tôt, tous les lots qui provoquent des durées d’arrêt du pipeline sont recherchés dans l’ordre chronologique. Par conséquent, pour un lot identifié, son volume est réduit au maximum possible.
- La seconde étape consiste à maximiser le taux de remplissage du pipeline. Elle s’effectue dans l’ordre chronologique décroissant. En partant du dernier lot jusqu’au premier, il est vérifié, pour chacun de ceux-ci, si l’augmentation de leur volume est possible sans introduire de nouveaux temps d’arrêt du pipeline.

Considérons un exemple d’une solution initiale, avec trois produits (p1, p2 et p3) et 6 lots planifiés sur un horizon temporel fixé, schématisé par la Figure 3.4. Après l’évaluation au plus tôt de cette séquence, on remarque que le lot 4 induit un temps d’arrêt du pipeline (schéma 1 de la Figure 3.4). En appliquant l’étape 1 de la méthode d’amélioration P1, le volume du lot 4 est réduit au maximum, afin de diminuer, voir supprimer, la durée d’arrêt du pipeline (schéma 2 de la Figure 3.4). Par la suite, l’étape 2 de la méthode P1 est appliquée : en utilisant l’évaluation au plus tard, on parcourt tous les lots de la séquence, en commençant par le dernier, pour vérifier s’il est possible d’augmenter leur volume, sans provoquer d’autres arrêts du pipeline. Le schéma 3 de la Figure 3.4 illustre le résultat obtenu après l’étape 2 de la méthode P1 : les dates de début et de fin de déchargement des lots sont poussées au plus tard, et les lots 1, 4 et 6 ont connu une augmentation de leur volume.

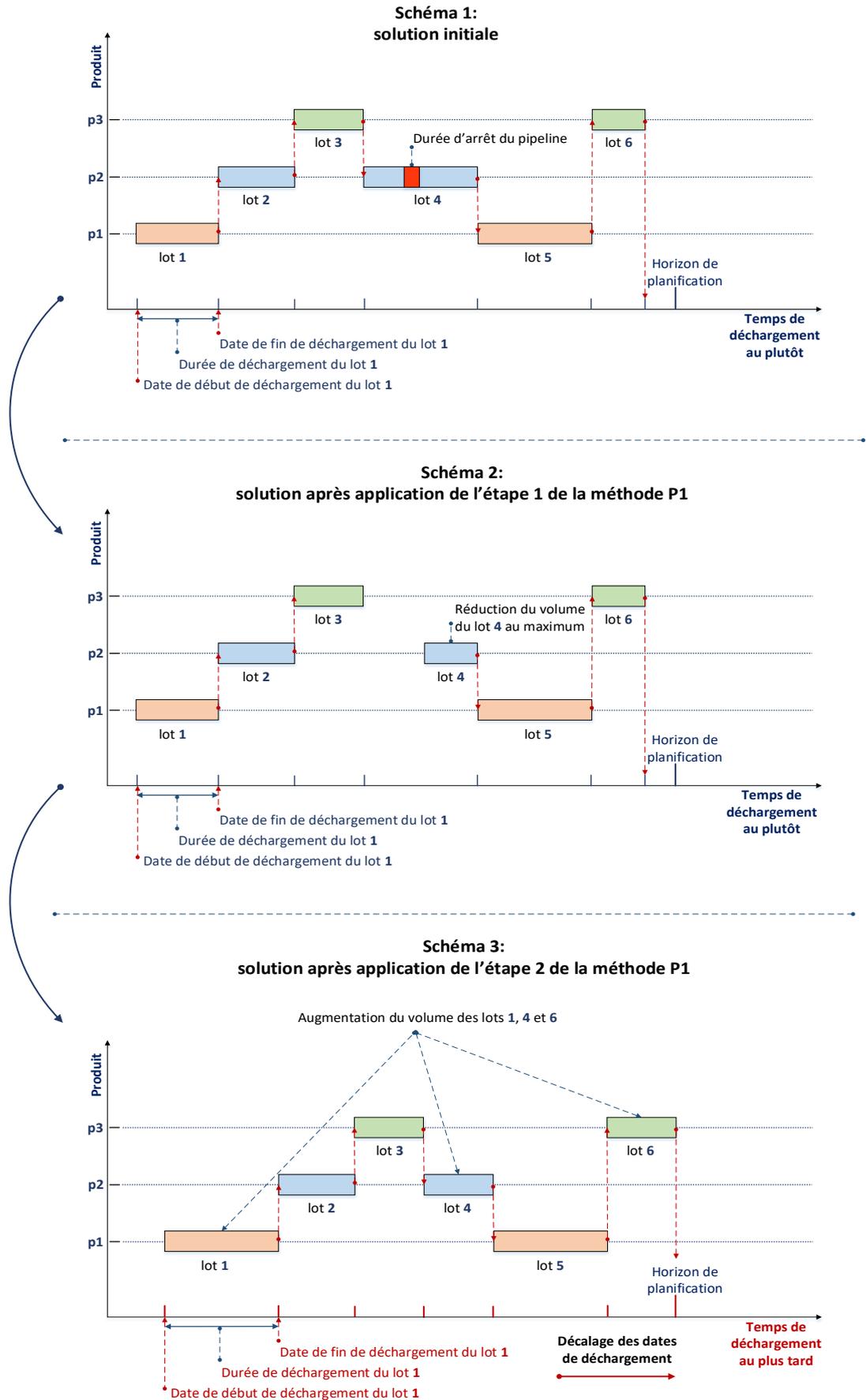


Figure 3.4 : Schémas des étapes 1 et 2 de la méthode d'amélioration P1

3.2.3.2 Seconde méthode d’amélioration

La seconde méthode d’amélioration, notée (P2), regroupe les lots en fonction de leur produit affecté et effectue des opérations d’ajustement du volume sur un groupe de lots avant d’appliquer l’augmentation du volume décrite dans la méthode d’amélioration P1.

L’ajustement du volume consiste à organiser le volume des lots du même produit dans un ordre croissant ou décroissant : une opération de tri par ordre croissant signifie que le transfert de volume entre les lots d’un même produit s’effectue du premier lot trouvé de la séquence vers les lots qui le suivent ; un réarrangement dans l’ordre décroissant permet de transférer le volume des lots d’un même groupe du dernier lot trouvé dans la séquence vers les lots qui le précèdent. Le volume à transférer d’un lot d’origine à un lot de destination ayant le même produit dépend du volume résiduel du lot de d’origine et de destination, ainsi que de la capacité résiduelle du stock du produit.

Un codage indirect composé du numéro du produit et de l’ordre de tri est proposé pour décrire une telle opération. Un arbre d’énumération est utilisé pour guider la sélection du groupe : chaque nœud représente une opération et est associé au codage correspondant. Un nouveau nœud descendant peut être ajouté s’il existe une opération qui n’a pas été effectuée sur le chemin reliant le nœud racine au nœud courant. Un chemin ne peut pas comprendre deux nœuds ayant un même produit. Un nombre de β nœuds est limité pour l’exploration sur l’arbre d’énumération.

Prenons comme exemple la solution représentée par la Figure 3.5 : cette séquence comporte 10 lots pour répondre à une demande de 3 produits (p1, p2 et p3) sur un horizon de planification défini.

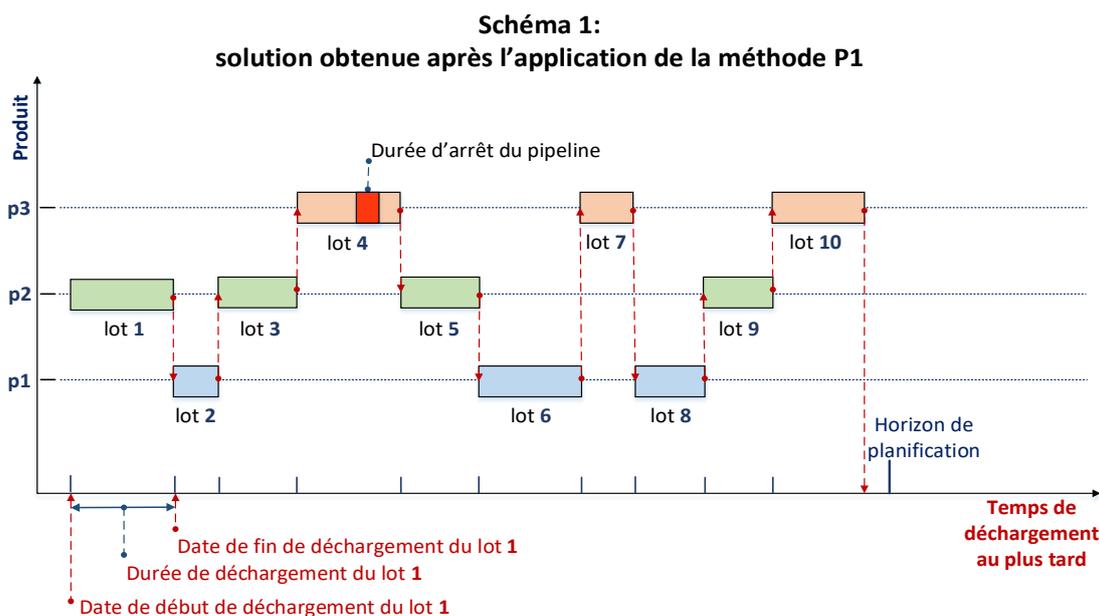


Figure 3.5 : Schéma d’une solution après l’application de la méthode P1

En appliquant la méthode d'amélioration P2, le transfert de volume s'effectuera entre les lots ayant le même produit, soit dans l'ordre croissant « C », ou dans l'ordre décroissant « D » (voir Figure 3.6) : les lots 2, 6 et 8 pour le produit p1 ; les lots 1, 3, 5 et 9 pour le produit p2 ; et les lots 4, 7 et 10 pour le produit p3.

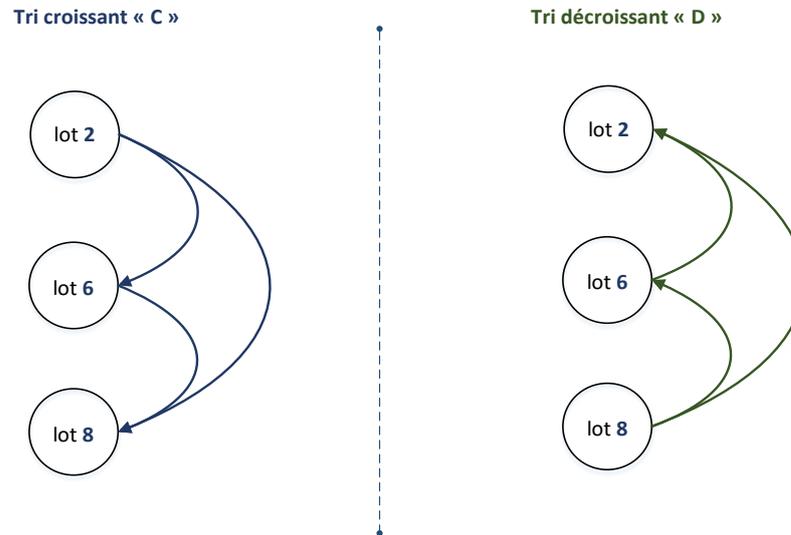


Figure 3.6 : Transfert de volume, dans l'ordre croissant ou décroissant, entre les lots du produit p1

Le codage composé du numéro du produit et de l'ordre du tri permet de créer les nœuds suivants pour les produits p1, p2 et p3 :

- Pour le produit p1 : « p1 : C » et « p1 : D » ;
- Pour le produit p2 : « p2 : C » et « p2 : D » ;
- Pour le produit p3 : « p3 : C » et « p3 : D ».

Pour chaque nœud retenu, un arbre d'énumération est construit, qui comporte les chemins à explorer par la méthode P2 afin d'ajuster les volumes des lots. La Figure 3.7 représente l'arbre correspondant au nœud racine « p1 :C ».

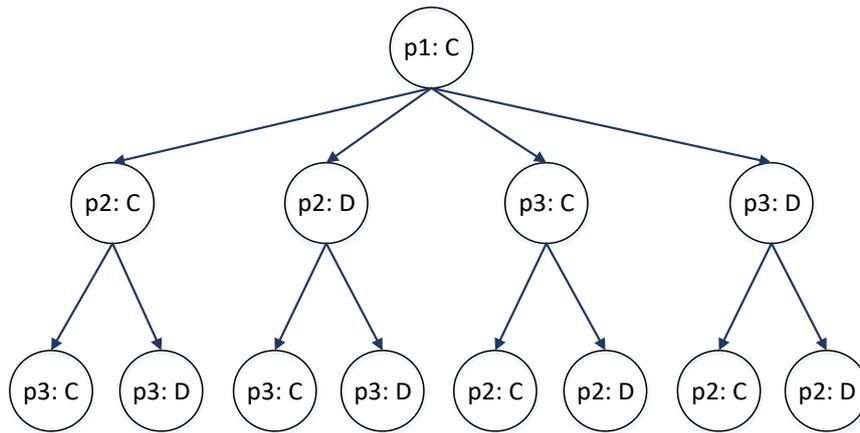


Figure 3.7 : Arbres d’énumération correspondant au produit p1 avec un tri croissant « C »

Par exemple, le chemin (p1 : C) signifie qu’il faut effectuer un transfert de volume entre les lots comportant le produit 1 dans l’ordre croissant. A partir de la Figure 3.7, l’arbre représenté comporte 13 chemins à explorer :

- Chemin 1 : (p1 : C) ;
- Chemin 2 : (p1 : C → p2 : C) ;
- Chemin 3 : (p1 : C → p2 : D) ;
- Chemin 4 : (p1 : C → p3 : C) ;
- Chemin 5 : (p1 : C → p3 : D) ;
- Chemin 6 : (p1 : C → p2 : C → p3 : C) ;
- Chemin 7 : (p1 : C → p2 : C → p3 : D) ;
- Chemin 8 : (p1 : C → p2 : D → p3 : C) ;
- Chemin 9 : (p1 : C → p2 : D → p3 : D) ;
- Chemin 10 : (p1 : C → p3 : C → p2 : C) ;
- Chemin 11 : (p1 : C → p3 : C → p2 : D) ;
- Chemin 12 : (p1 : C → p3 : D → p2 : C) ;
- Chemin 13 : (p1 : C → p3 : D → p2 : D) ;

Les arbres correspondants aux 5 nœuds restants sont similaires à celui illustré par la Figure 3.7. Par conséquent, le nombre total de chemins est de $13 * 6 = 78$. Lorsque chaque chemin est exploré, l’étape 2 de la méthode d’amélioration P1 est appliquée : il s’agit de vérifier, dans l’ordre chronologique inverse, pour chaque lot, si une augmentation du volume est possible, sans induire de nouveaux arrêts du pipeline.

3.2.3.3 Troisième méthode d'amélioration

La troisième méthode, notée (P3), cherche à réduire les durées d'arrêt du pipeline à partir de plusieurs opérations basées sur le transfert de volume entre chaque paire de lots contenant le même produit. Cette procédure s'effectue en deux étapes :

- Dans la première étape (voir Figure 3.8), la procédure recherche, à partir de la fin de la séquence, tout lot ayant un volume supérieur à son volume minimum, nommé « lot d'origine ». Ensuite, la séquence est parcourue de nouveau, dans l'ordre chronologique, afin de chercher le premier lot comportant le même produit que le lot d'origine. Ce lot est appelé « lot de destination ». Le volume à transférer depuis le lot d'origine jusqu'au lot de destination prend en considération la capacité résiduelle du stock, afin d'éviter la saturation de la capacité de stockage, et donc éviter les arrêts du pipeline ;

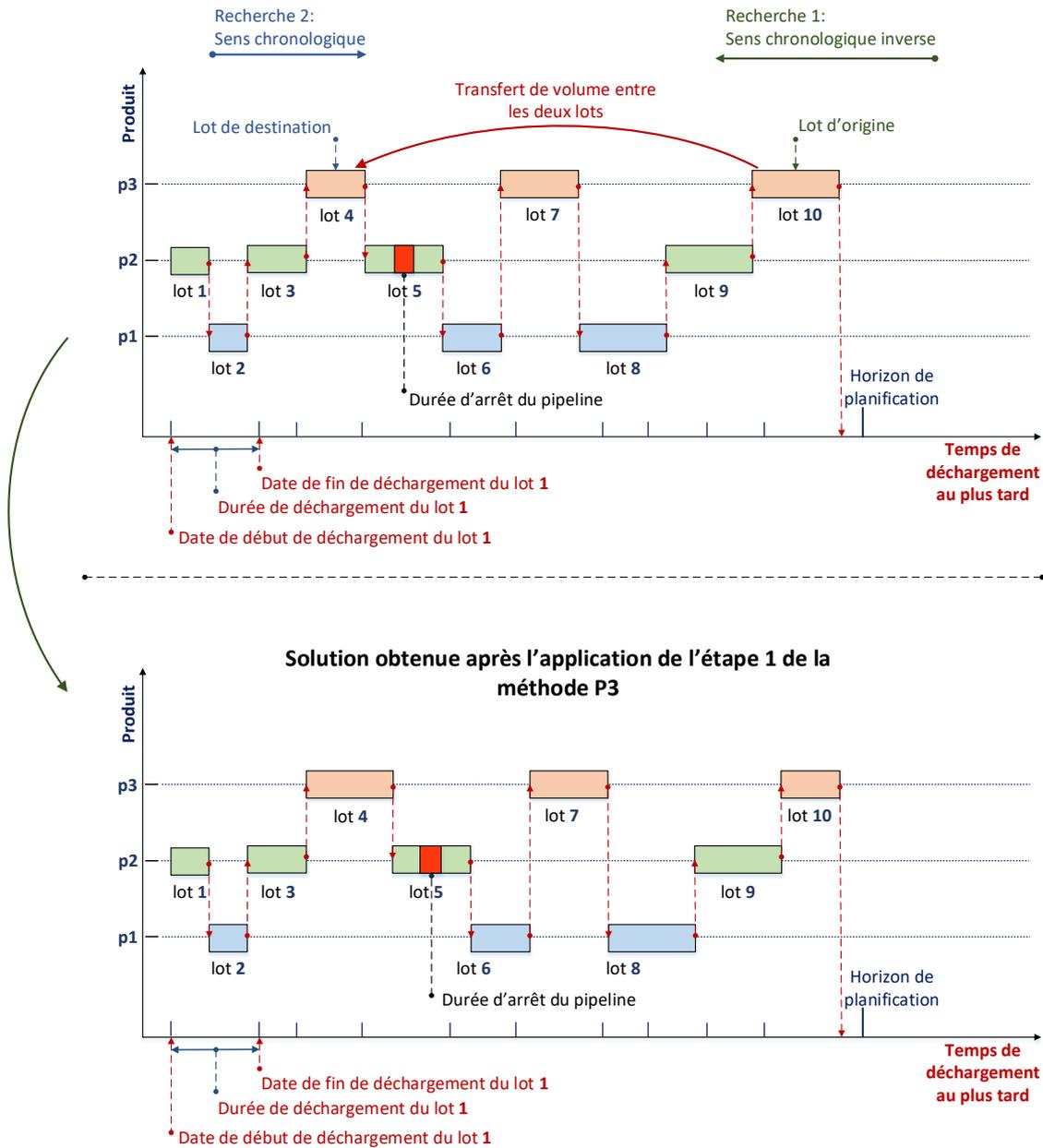


Figure 3.8 : Application de l'étape 1 de la méthode d'amélioration P3

- La deuxième étape (voir Figure 3.9) consiste à rechercher, tout d'abord, dans l'ordre chronologique, le lot ayant provoqué un temps d'arrêt de pipeline, nommé lot bloquant, afin d'éviter la rupture du stock du produit contenu dans ce lot. Puis, une seconde recherche est effectuée depuis le dernier lot de la séquence jusqu'au lot bloquant, pour trouver tout lot possédant un volume inférieur à son volume maximum. Ce lot est nommé « lot de destination ». Par la suite, la méthode (P3) réalise une troisième recherche dans l'ordre inverse, depuis le lot bloquant jusqu'au premier lot, afin d'identifier un lot dont le volume est supérieur au volume minimum, et qui contient le même produit que le lot de destination. Ce lot est considéré comme lot d'origine. Le

transfert de volume depuis le lot d'origine jusqu'au lot de destination tient en compte du stock après la période de stabilisation, pour éviter la rupture de stock. Après chaque opération de transfert de volume, la seconde étape de la méthode (P1) est appliquée. Elle recherche, dans l'ordre chronologique inverse, toute augmentation possible des lots de la séquence, sans provoquer de nouveaux arrêts du pipeline.

Schéma 1:
solution obtenue après l'application de l'étape 1 de la méthode P3

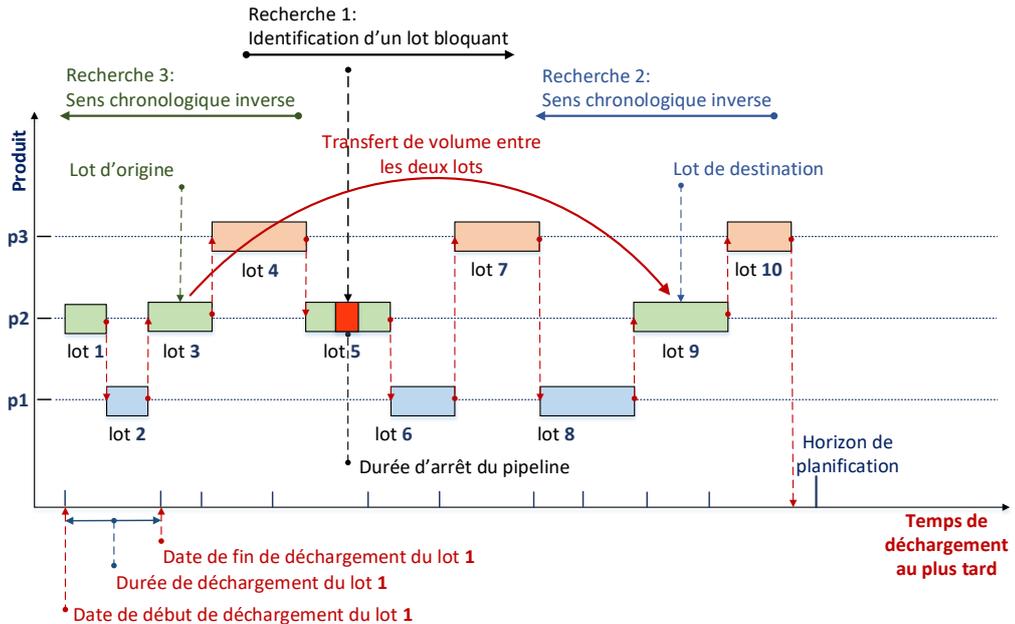


Schéma 2:
solution obtenue après l'application de l'étape 2 de la méthode P3

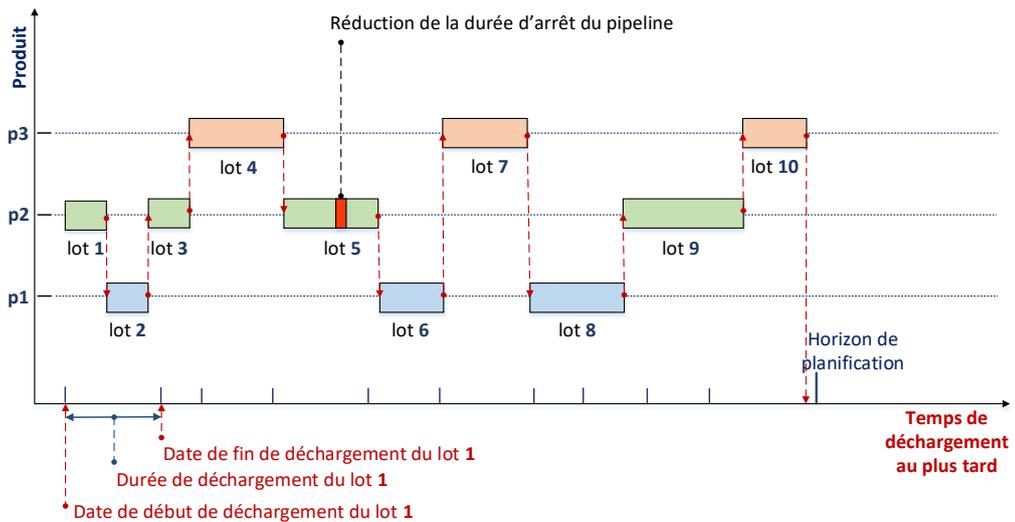


Figure 3.9 : Application de l'étape 2 de la méthode d'amélioration P3

En considérant un lot d’origine donné, plusieurs lots de destination pourraient existés. De ce fait, l’opération de transfert de volume fournissant la meilleure solution est retenue par la procédure.

3.2.4 Exemple numérique

En vue d’illustrer chaque étape du GRASP-like proposé, un exemple sur une des instances générées à la section (2.5) du chapitre 2, ayant un horizon de planification de 30 jours et 6 produits, est donné dans cette section. Pour rappel, ces instances ont été générées à partir de l’instance présentée par (Cafaro and Cerdá, 2008). Le système étudié est composé d’un pipeline unidirectionnel d’une longueur de 147 Km et d’une capacité de 18000 m^3 transportant 6 produits pétroliers avec un débit de 530 m^3/h afin de répondre à une demande en aval, sur un horizon de planification fixé. Les produits transportés par pipeline sont stockés au centre de distribution pendant une durée de stabilisation de 24 heures, avant d’être livrés aux clients.

Cette instance est désignée par « Exemple de Référence 1 » (ER1) dans le reste de cette section. Le détail de (ER1) est élaboré dans le Tableau 3.1 et le Tableau 3.2. En effet, le Tableau 3.1 présente des données relatives aux produits à transporter, à savoir : le volume minimum/maximum des lots, la capacité des stocks en aval, le stock initial au niveau du centre de distribution et la demande totale sur les 30 jours. La demande journalière de chaque produit est déduite de la demande totale, en divisant cette dernière par 30 jours.

Par ailleurs, le Tableau 3.2 illustre la matrice de compatibilité des produits considérés, et qui distinguent les séquences autorisées, avec une valeur égale à 1, des séquences interdites entre les produits, avec une valeur 0.

Tableau 3.1 : Données d’entrée d’une instance avec un horizon de planification de 30 jours et 6 produits

| Produit | Volume minimum du lot (m^3) | Volume maximum du lot (m^3) | Capacité de stock (m^3) | Stock initial (m^3) | Demande totale (30 jours) (m^3) |
|---------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 17300 | 18000 | 81500 | 49910 | 200340 |
| 2 | 800 | 16000 | 32000 | 21680 | 68190 |
| 3 | 800 | 16000 | 24000 | 17990 | 14010 |
| 4 | 3800 | 16000 | 27800 | 18450 | 68690 |
| 5 | 860 | 3440 | 10320 | 9710 | 8600 |
| 6 | 4920 | 8200 | 13120 | 8420 | 15770 |

Tableau 3.2 : Matrice de compatibilité considérée pour 6 produits

| | | Produit | | | | | |
|---------|---|---------|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Produit | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| | 4 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| | 5 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

A partir de l'instance (ER1), une solution initiale est obtenue par l'heuristique de construction (sous-section 3.2.4.1). Puis, cette solution initiale est améliorée par la procédure d'amélioration locale, pour fournir une meilleure solution (sous-section 3.2.4.2). Enfin, la solution améliorée est comparée à celle fournie par le modèle linéaire proposé dans le chapitre 2 (sous-section 3.2.4.3).

3.2.4.1 Heuristique de construction - exemple

a. Initialisation (lignes 12 à 16 de l'Algorithme 1)

Il est considéré que le pipeline est initialement rempli avec le produit 1, comme le montre la Figure 3.10. De plus, à partir de celle-ci, il est remarqué que le temps courant de déchargement au centre de distribution, désigné par « *current_time* », égale à 0, ce qui réfère au début de l'horizon de planification.

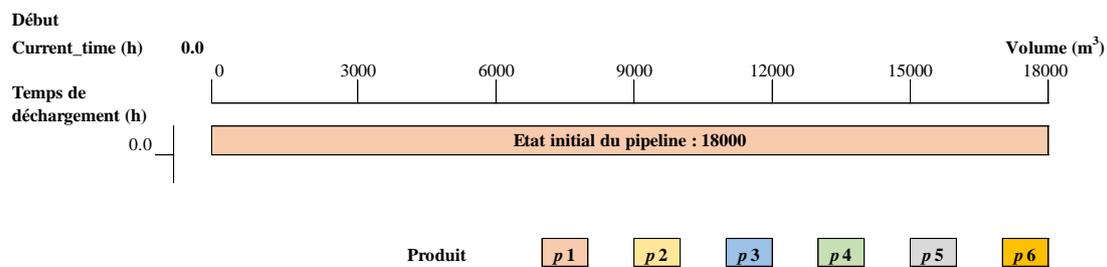


Figure 3.10 : Etat du pipeline au début de l'horizon de planification

Par la suite, chaque itération de l'algorithme passe par quatre ou cinq étapes, selon qu'il y ait un déclenchement ou non du processus de réparation. A la fin de chaque itération, le « *current_time* » est mis à jour, jusqu'à ce qu'il atteigne la fin de l'horizon de planification.

b. Sélection d'un produit (lignes 19 à 24 de l'Algorithme 1)

La construction se fait de manière itération. L'étape de sélection d'un produit est détaillée dans le Tableau 3.3. En effet, celui-ci représente, à l'itération 1, pour chaque produit, les éléments suivants : la demande journalière, la demande horaire qui est calculée à partir de la

première en effectuant une division par 24 heures, l’autonomie, le volume minimum/maximum des lots, la capacité de stock et le stock initial.

Il est remarqué, à partir du Tableau 3.3, que le produit ayant l’autonomie la plus faible est du produit 4, avec une valeur de 193.4 heures. La liste des candidatures doit comprendre les produits dont l’autonomie ne dépasse pas un seuil fixé. Si l’on fixe ce seuil à 72 heures, la liste des candidatures doit contenir les produits 2 et 4 à l’itération 1. Le produit 4 est sélectionné de façon aléatoire pour l’insertion, i.e. $Prod_dest = 4$. La colonne correspondante au produit retenu est coloriée en orange dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Choix d’un produit de la « RCL_list » (itération 1 de l’algorithme)

| | | | | | | | | |
|----------------------------|--------|---|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| Itération | 1 | Produit | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Current_time (h) | 0.0 | Demande journalière (m^3) | 6678.0 | 2273.0 | 467.0 | 2290.0 | 287.0 | 526.0 |
| Jour t | 1 | Demande horaire (m^3/h) | 278.3 | 94.7 | 19.5 | 95.4 | 11.9 | 21.9 |
| | | Autonomie (h) | 179.4 | 228.9 | 924.5 | 193.4 | 812.9 | 384.4 |
| RCL_list : | {2, 4} | Volume maximum (m^3) | 18000.0 | 16000.0 | 16000.0 | 16000.0 | 3440.0 | 8200.0 |
| List_prod : | {4} | Volume minimum (m^3) | 17300.0 | 800.0 | 800.0 | 3800.0 | 860.0 | 4920.0 |
| | | Capacité de stock (m^3) | 81500.0 | 32000.0 | 24000.0 | 27800.0 | 10320.0 | 13120.0 |
| | | Stock initial (m^3) | 49910.0 | 21680.0 | 17990.0 | 18450.0 | 9710.0 | 8420.0 |

c. Identification de la liste des produits (ligne 28 de l’Algorithme 1)

Initialement, la séquence contient un lot comportant le produit 1. L’insertion du nouveau lot utilise la structure arborescente correspondante au produit 1 (illustrée par la Figure 3.11). Cet arbre est construit utilisant la matrice de compatibilité de produits donnée par Tableau 3.2. Comme l’on peut voir sur cette structure arborescente, seuls les trois produits (2, 3 et 4) sont compatibles directement avec le produit 1 : puisque le nœud 1 (racine) possède 3 nœuds fils. De manière récursive, pour chaque nœud fils, tous les nœuds descendants sont explorés. Il faut noter qu’un nœud redondant n’est pas autorisé sur chaque chemin reliant le nœud racine et les feuilles de l’arbre. La construction de l’arbre se termine lorsqu’il n’y a plus de nœud descendant possible pour toutes les feuilles de la structure arborescente.

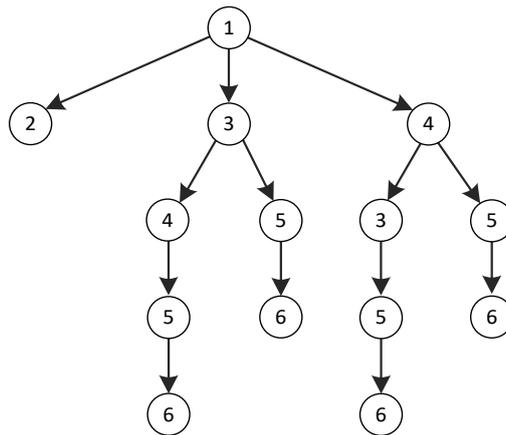


Figure 3.11 : Arbre correspondant au produit 1

Dans le cas où le produit du nouveau lot est compatible au produit 1, on renvoie une liste contenant du produit. Si $Prod_dest = 4$, alors $List_prod$ contiendra le produit 4.

Dans le cas d'insertion d'un produit non compatible au produit 1, il faut chercher un chemin sur l'arbre. Par exemple, si le produit 6 est sélectionné pour l'insertion d'un nouveau lot mais qui n'est pas compatible avec le produit 1. Les chemins possibles entre ce dernier et le produit 6 sont les suivants : $\{1, 3, 4, 5, 6\}$, $\{1, 3, 5, 6\}$, $\{1, 4, 3, 5, 6\}$ et $\{1, 4, 5, 6\}$. La sélection d'un chemin dépend du nombre de produits. Puisque les deux chemins $\{1, 3, 5, 6\}$ et $\{1, 4, 5, 6\}$ possèdent le plus faible nombre de produits, alors le premier d'entre eux est choisi ; dans ce cas, il s'agit du chemin $\{1, 3, 5, 6\}$. De ce fait, les produits contenus dans la liste $List_prod$ sont : 3, 5 et 6.

d. Insertion de nouveaux lots (lignes 31 à 35 de l'Algorithme 1)

Pour le produit 4, la valeur de sa capacité résiduelle, notée cap_resd_4 est calculée comme suit : $cap_resd_4 = (27800 - 18450) + \left(\frac{18000}{530}\right) * 95.4 = 12590.1 m^3$.

Par la suite, le volume du lot est déterminé en considérant le minimum entre le volume maximum et la capacité résiduelle. Comme établi dans le Tableau 3.4, puisque le volume maximum d'un lot comportant le produit 4 est $16000 m^3$, alors le volume du lot 2 créé, noté Q_2 est défini par : $Q_2 = \min(16000; 12590.1) = 12590.1 m^3$.

Une fois le volume du nouveau lot déterminé, celui-ci est inséré dans la séquence en cours, comme l'illustre la Figure 3.12. A partir de celle-ci, il est constaté qu'à la fin de déchargement du lot 2, l'état en cours du pipeline contiendra à l'itération suivante le(s) nouveau(x) produit(s) choisi(s).

Tableau 3.4 : détermination du volume d’un nouveau lot

| | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------|---|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| Itération | 1 | Produit | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Current_time (h) | 0 | Demande journalière (m^3) | 6678.0 | 2273.0 | 467.0 | 2290.0 | 287.0 | 526.0 |
| Jour t | 1 | Demande horaire (m^3/h) | 278.3 | 94.7 | 19.5 | 95.4 | 11.9 | 21.9 |
| | | Autonomie (h) | 179.4 | 228.9 | 924.5 | 193.4 | 812.9 | 384.4 |
| RCL_list | {2, 4} | Volume maximum (m^3) | 18000.0 | 16000.0 | 16000.0 | 16000.0 | 3440.0 | 8200.0 |
| List_prod | {4} | Volume minimum (m^3) | 17300.0 | 800.0 | 800.0 | 3800.0 | 860.0 | 4920.0 |
| | | Capacité stock (m^3) | 81500.0 | 32000.0 | 24000.0 | 27800.0 | 10320.0 | 13120.0 |
| N° de Lot | 2 | Stock initial (m^3) | 49910.0 | 21680.0 | 17990.0 | 18450.0 | 9710.0 | 8420.0 |
| Produit | 4 | Capacité résiduelle (m^3) | | | | 12590.1 | | |
| Volume (m^3) | 12590.1 | | | | | | | |

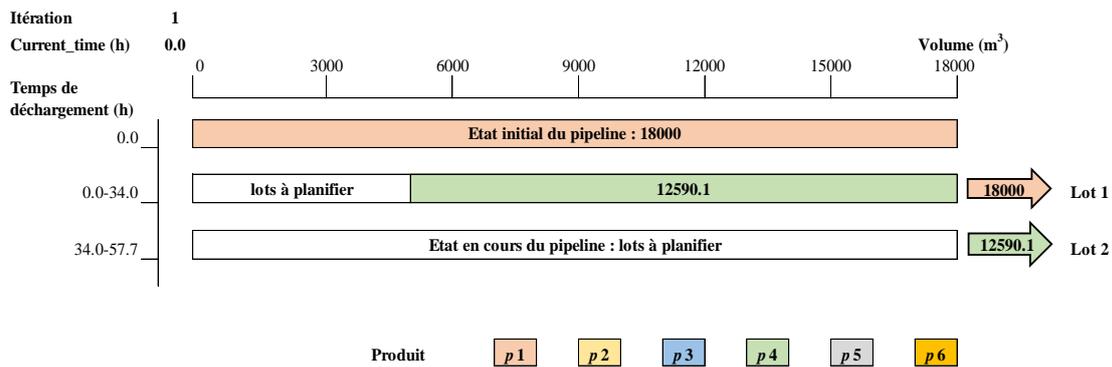


Figure 3.12 : Ordonnancement des lots après l’itération 1 de l’algorithme

e. Evaluation d’une séquence durant la construction (ligne 38 de l’Algorithme 1)

Après l’insertion du lot 2, le stock total, noté « Product_daily_total_storage », et le stock des produit prêts à être livrés, indiqué par « Product_daily_after_settling_storage », sont déterminés jusqu’au jour 3, puisque la date de fin de déchargement du lot 2, comportant le produit 4 (voir Figure 3.12), inséré à cette itération, égale à 57.7 heures. Le Tableau 3.5 fournit des éléments liés au déchargement de chaque lot, à savoir la date et le jour début et de fin de déchargement, le volume quotidien déchargé et le volume déchargé cumulé. Ces éléments sont fournis par la fonction de l’évaluation.

Tableau 3.5 : Opérations de déchargement la séquence de lots à la fin de l'itération 1

| Jour | Heure fin | Lot | Produit | Volume du lot (m^3) | Volume du jour déchargé (m^3) | Volume cumulé (m^3) | Durée de déchargement (h) | Date de déchargement (h) | |
|------|-----------|-----|---------|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|
| | | | | | | | | Début | Fin |
| - | 0 | 1 | 1 | 18000 | - | - | - | - | - |
| 1 | 24 | 1 | 1 | 18000 | 12720.0 | 12720.0 | 34.0 | 0.0 | 24.0 |
| 2 | 48 | 1 | 1 | 18000 | 5280.0 | 18000.0 | | 24.0 | 34.0 |
| 2 | 48 | 2 | 4 | 12590.1 | 7440.0 | 7440.0 | 23.7 | 34.0 | 48,0 |
| 3 | 72 | 2 | 4 | 12590.1 | 5150.1 | 12590.1 | | 48.0 | 57.7 |

La fonction d'évaluation donne également les niveaux de stocks pour chaque produit à la fin de chaque journée (Tableau 3.6). Pour chaque produit, on distingue deux volumes en stock : le volume livrable et le volume total. Le volume livrable est le niveau de stock qui est prêt à être livré aux clients, sans inclure le volume en cours de déchargement ou en stabilisation. Ces deux derniers sont comptés dans le volume total, en plus du volume livrable. Comme illustré dans le Tableau 3.6, le lot 1 contenant du produit 1 est déchargé durant les deux premiers jours, on peut remarquer une différence entre les deux volumes. La stabilisation du lot 1 se termine au jour 3, on peut voir que les deux volumes deviennent identiques. Une telle différence peut également être observée durant le déchargement du lot 2 (contenant du produit 4) aux jours 2 et 3. Une valeur négative du volume livrable d'un produit signifie qu'il existe une rupture de stock.

La fonction d'évaluation met à jour également le temps courant : après le déchargement de la séquence des deux lots, le temps courant est mis à jour en considérant la date de fin de déchargement du deuxième lot. C'est-à-dire, le temps actuel vaut 57.7 heures.

Tableau 3.6 : Niveau de stock après le déchargement de la séquence des deux lots

| Jour | Stock (m^3) | | | | | | | | | | | |
|-------|-----------------|----------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|----------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | produit 1 | | produit 2 | | produit 3 | | produit 4 | | Produit 5 | | produit 6 | |
| | Volume livrable | Volume total | Volume livrable | Volume total | Volume livrable | Volume total | Volume livrable | Volume total | Volume livrable | Volume total | Volume livrable | Volume total |
| Début | 49910.0 | 49910.0 | 21680.0 | 21680.0 | 17990.0 | 17990.0 | 18450.0 | 18450.0 | 9710.0 | 9710.0 | 8420.0 | 8420.0 |
| 1 | 43232.0 | 55952.0 | 19407.0 | 19407.0 | 17523.0 | 17523.0 | 16160.3 | 16160.3 | 9423.3 | 9423.3 | 7894.3 | 7894.3 |
| 2 | 36554.0 | 54554.0 | 17134.0 | 17134.0 | 17056.0 | 17056.0 | 13870.7 | 21310.7 | 9136.7 | 9136.7 | 7368.7 | 7368.7 |
| 3 | 47876.0 | 47876.0 | 14861.0 | 14861.0 | 16589.0 | 16589.0 | 11581.0 | 24171.1 | 8850.0 | 8850.0 | 6843.0 | 6843.0 |

f. Démarrage de la procédure de réparation (lignes 23 et 42 de l'Algorithme 1)

La Figure 3.13 montre l'insertion du lot 26, comportant le produit 2 avec un volume de $16000 m^3$. Après l'évaluation, la date de fin de déchargement du lot 26 vaut 694.9 heures.

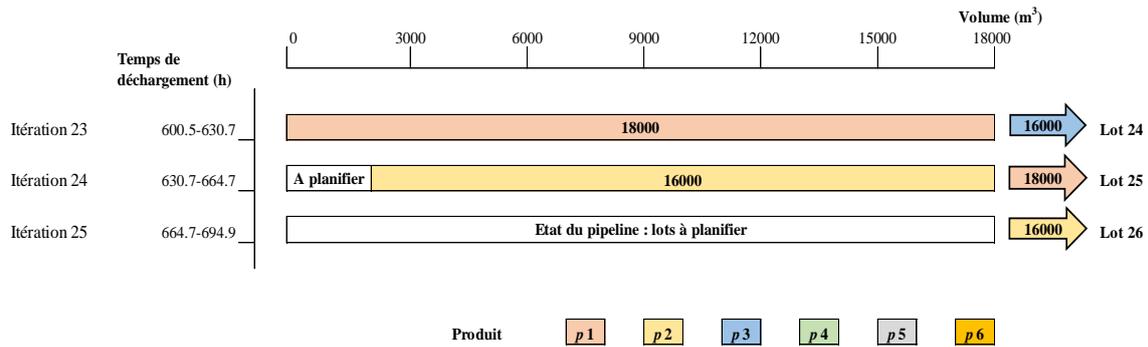


Figure 3.13 : Lot créé et inséré à la séquence au cours à l’itération 25 de l’algorithme

Par la suite, à l’itération 26 (voir Tableau 3.7), les produits identifiés dans la liste des candidats à l’étape 1 sont 1 et 4. Le produit 4 est sélectionné de manière aléatoire. Puisqu’il n’est pas compatible avec le dernier produit de la séquence courante (produit 2 inséré à l’itération précédente), alors il est nécessaire de trouver un chemin qui relie entre ces deux produits.

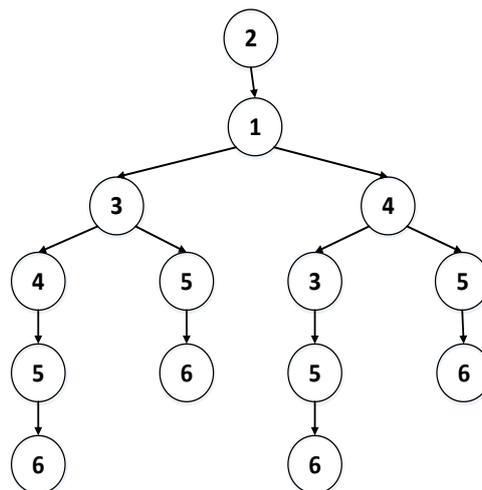


Figure 3.14 : Arbre correspondant au produit 2

D’après l’arbre du produit 2 (voir Figure 3.14), les chemins identifiés sont les suivants : $\{2, 1, 4\}$ et $\{2, 1, 3, 4\}$. Cependant, aucun de ces chemins ne permet d’insérer le produit 4 sans dépasser l’horizon de planification de 720 heures. C’est la raison pour laquelle la liste des candidats à la fin de l’étape 2 est renvoyée vide.

Tableau 3.7 : Identification des produits à insérer dans la « List_prod » à l'itération 26 de l'algorithme

| | | | | | | | | |
|----------------------------|--------|---|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Itération | 26 | Produit | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Current_time (h) | 694.9 | Demande journalière (m^3) | 6678.0 | 2273.0 | 467.0 | 2290.0 | 287.0 | 526.0 |
| Jour t | 29 | Demande horaire (m^3/h) | 278.3 | 94.7 | 19.5 | 95.4 | 11.9 | 21.9 |
| | | Autonomie (h) | 63.1 | 208.7 | 1133.0 | 125.2 | 791.3 | 437.2 |
| RCL_list | {1, 4} | Volume maximum (m^3) | 18000.0 | 16000.0 | 16000.0 | 16000.0 | 3440.0 | 8200.0 |
| List_prod | vide | Volume minimum (m^3) | 17300.0 | 800.0 | 800.0 | 3800.0 | 860.0 | 4920.0 |
| | | Capacité stock (m^3) | 81500.0 | 32000.0 | 24000.0 | 27800.0 | 10320.0 | 13120.0 |
| | | Stock total (jour t) (m^3) | 17548.0 | 19763.0 | 22047.0 | 11941.2 | 9451.7 | 9575.7 |

Par conséquent, la procédure de réparation est déclenchée, et cherche à supprimer successivement les derniers lots de la séquence en cours (étape 1 de l'Algorithme 2). On commence par la suppression du dernier lot : il s'agit du lot 26 qui contient le produit 2 (voir Figure 3.15). Après suppression du lot 26, le dernier lot de la séquence devient le lot 25 comportant le produit 1.

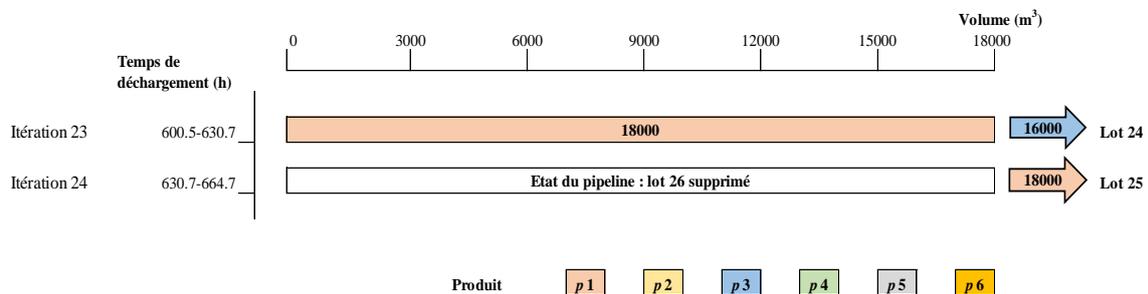


Figure 3.15 : Suppression du dernier lot de la séquence courante à l'étape 1 de la procédure de réparation

Dans un second temps, la procédure de réparation prend un chemin alternatif non exploré au produit 1, à l'aide de la liste tabou associée à chaque lot (étape 2 de l'Algorithme 2). Cette liste comporte tous chemins déjà utilisés, afin d'éviter des insertions répétitives. Dans cet exemple, vu que la liste tabou associée au dernier lot contient uniquement le produit 2, alors il reste 5 produits candidats. Parmi ces derniers, un est choisi selon l'autonomie du stock la plus faible : il s'agit dans ce cas du produit 4. Celui-ci est retenu seul dans la liste des candidats, puisqu'il est compatible avec le produit 1 contenu dans le dernier lot.

Par la suite, un nouveau lot est créé, numéroté 26 et contenant le produit 4 choisi, à l'itération 27 de l'algorithme, puis inséré dans la séquence en cours (voir Figure 3.16).

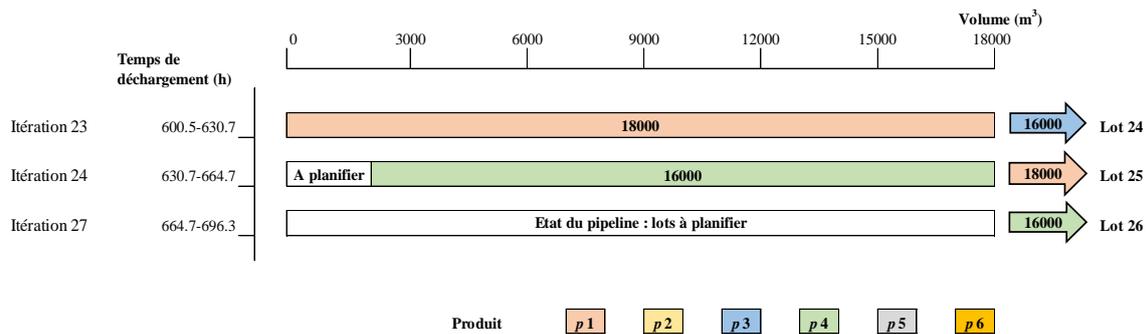


Figure 3.16 : Création et insertion d’un nouveau lot après le processus de réparation à l’itération 27 de l’algorithme

g. Exemple d’une solution initiale

Le Tableau 3.8 illustre une solution initiale de de l’instance (ER1) fournie par l’heuristique de construction. Cette solution initiale comporte 26 lots planifiés. Le numéro de lot, le produit ainsi que le volume des lots sont donnés dans les 3 premières colonnes du Tableau 3.8. De plus, l’évaluation des dates de déchargement des lots au plus tôt et au plus tard pour cette solution initiale est représentée dans les 4 dernières colonnes. On remarque que la date de début de déchargement du premier lot peut être retardée de 84.7 heures par rapport à la date de début d’ordonnement (0.0 h), et que la date de fin de déchargement au plus tard coïncide avec la fin de l’horizon de planification. Par ailleurs, les dates coloriées en bleu et en rouge indique qu’il y a des périodes d’arrêt du pipeline.

Tableau 3.8 : Exemple d'une solution initiale avec les dates de déchargement

| Numéro de lot | Produit | Volume (m^3) | Date de déchargement (h) | | | |
|---------------|---------|------------------|--------------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| | | | Evaluation au plus tôt | | Evaluation au plus tard | |
| | | | Début | Fin | Début | Fin |
| 1 | 1 | 18000.0 | 0.0 | 34.0 | 84.7 | 118.7 |
| 2 | 4 | 12590.1 | 34.0 | 57.7 | 118.7 | 142.5 |
| 3 | 1 | 18000.0 | 57.7 | 91.7 | 142.5 | 176.4 |
| 4 | 2 | 16000.0 | 91.7 | 121.9 | 176.4 | 206.6 |
| 5 | 1 | 18000.0 | 121.9 | 155.8 | 206.6 | 240.6 |
| 6 | 3 | 800.0 | 155.8 | 157.3 | 240.6 | 242.1 |
| 7 | 5 | 2895.0 | 157.3 | 168.5 | 242.1 | 247.5 |
| 8 | 6 | 8200.0 | 168.5 | 184.0 | 247.5 | 263.0 |
| 9 | 5 | 860.0 | 184.0 | 240.5 | 263.0 | 264.6 |
| 10 | 4 | 16000.0 | 240.5 | 270.7 | 264.6 | 294.8 |
| 11 | 1 | 17300.0 | 270.7 | 303.4 | 294.8 | 327.5 |
| 12 | 2 | 16000.0 | 303.4 | 333.5 | 327.5 | 357.7 |
| 13 | 1 | 18000.0 | 333.5 | 367.5 | 357.7 | 391.6 |
| 14 | 4 | 16000.0 | 367.5 | 397.7 | 391.6 | 421.8 |
| 15 | 1 | 18000.0 | 397.7 | 431.7 | 421.8 | 455.8 |
| 16 | 2 | 16000.0 | 431.7 | 461.8 | 455.8 | 486.0 |
| 17 | 1 | 18000.0 | 461.8 | 495.8 | 486.0 | 519.9 |
| 18 | 4 | 15301.5 | 495.8 | 528.3 | 519.9 | 548.8 |
| 19 | 1 | 18000.0 | 528.3 | 562.3 | 548.8 | 582.8 |
| 20 | 3 | 800.0 | 562.3 | 563.8 | 582.8 | 584.3 |
| 21 | 5 | 3440.0 | 563.8 | 570.3 | 584.3 | 590.8 |
| 22 | 6 | 8200.0 | 570.3 | 585.8 | 590.8 | 606.2 |
| 23 | 5 | 860.0 | 585.8 | 600.5 | 606.2 | 607.8 |
| 24 | 3 | 16000.0 | 600.5 | 630.7 | 607.8 | 638.0 |
| 25 | 1 | 18000.0 | 630.7 | 664.7 | 638.0 | 672.0 |
| 26 | 4 | 16000.0 | 664.7 | 696.3 | 689.8 | 720.0 |

Les deux modes d'évaluation donnent le même résultat au niveau de la fonction objectif. Cette dernière est composée de deux critères : le premier critère (T1) représente le volume total transporté dans le pipeline durant l'horizon temporel ; le second critère (T2) concerne le volume total contaminé entre les lots successifs. Après l'évaluation de la solution initiale, le T1 vaut $327246.6 m^3$, équivalant à un taux de remplissage du pipeline de 85.8%, avec une durée d'arrêt de 102.6 heures ; et le T2 vaut 5000 qui dépend du nombre de lots. Le détail est donné dans le Tableau 3.9.

Tableau 3.9 : Critères d’optimisation de la solution initiale obtenue

| | |
|---|----------|
| Critère T1 : volume total transporté (m^3) | 327246.6 |
| Temps d'arrêt totale du pipeline (h) | 102.6 |
| Taux de remplissage du pipeline | 85.76% |
| Critère T2 : coût du volume contaminé (m^3) | 5000.0 |
| Nombre de lots | 26 |
| Fonction objectif = T1 – T2 | 322246.6 |

Par ailleurs, la Figure 3.17 et la Figure 3.18 illustrent un diagramme de Gantt effectué en considérant respectivement les dates de déchargement au plus tôt et au plus tard. Cette représentation montre l’état du pipeline après le déchargement de chaque lot planifié. Elle est souvent utilisée dans la littérature pour illustrer la solution obtenue (voir (Relvas et *al.*, 2006) et (Cafaro and Cerdá, 2008)).

Il est remarqué, à partir de la Figure 3.17, que les temps d’arrêt du pipeline se situent à la fin de la journée, dans le cas de l’évaluation au plus tôt. Cependant, pour les dates de déchargement au plus tard (voir Figure 3.18), nous observons que ces durées d’arrêt se trouvent en début de journée. A la fin de l’horizon de planification, il est noté que l’état final du pipeline comprend un lot fictif.

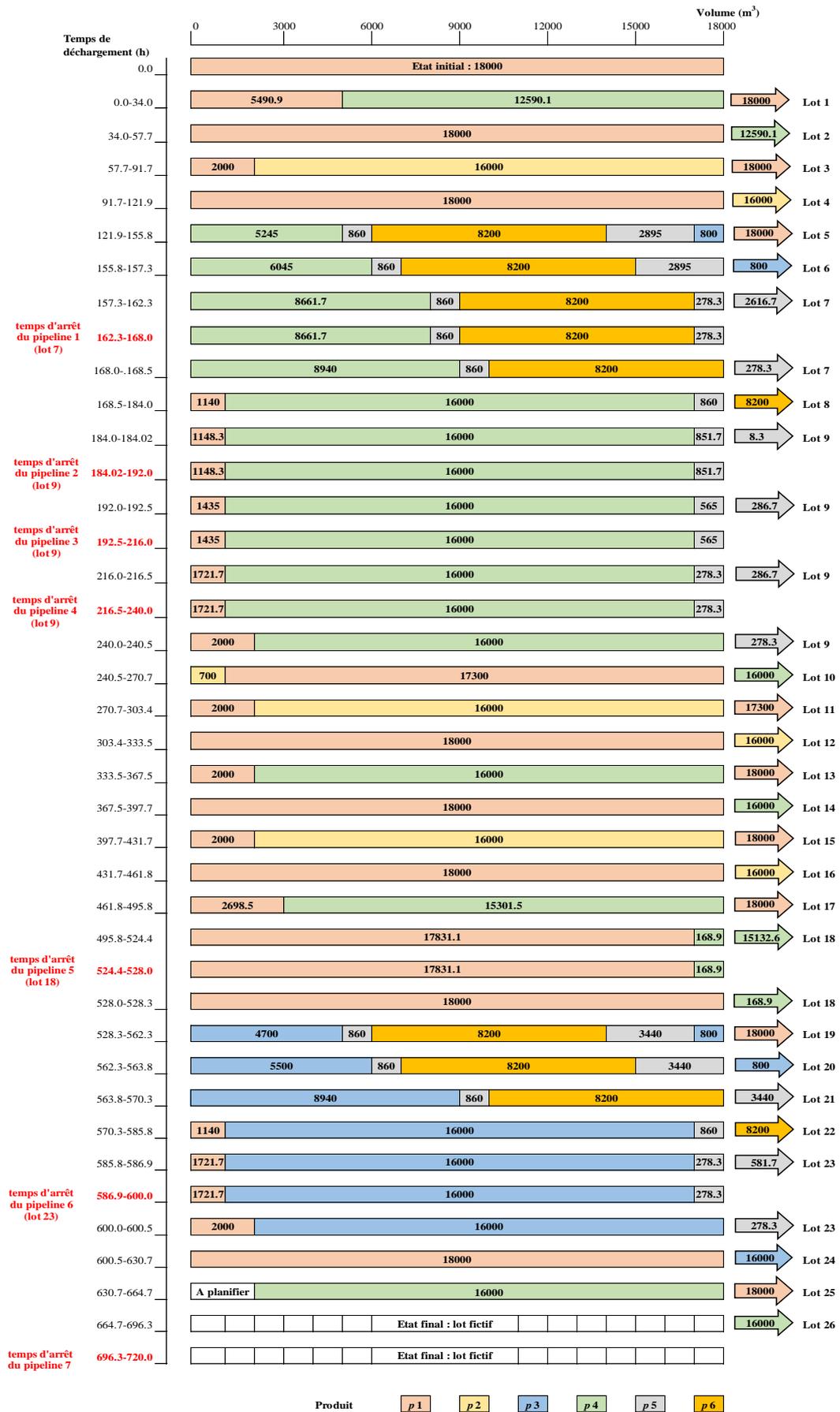


Figure 3.17 : Ordonnancement des lots obtenu après l'évaluation au plus tôt

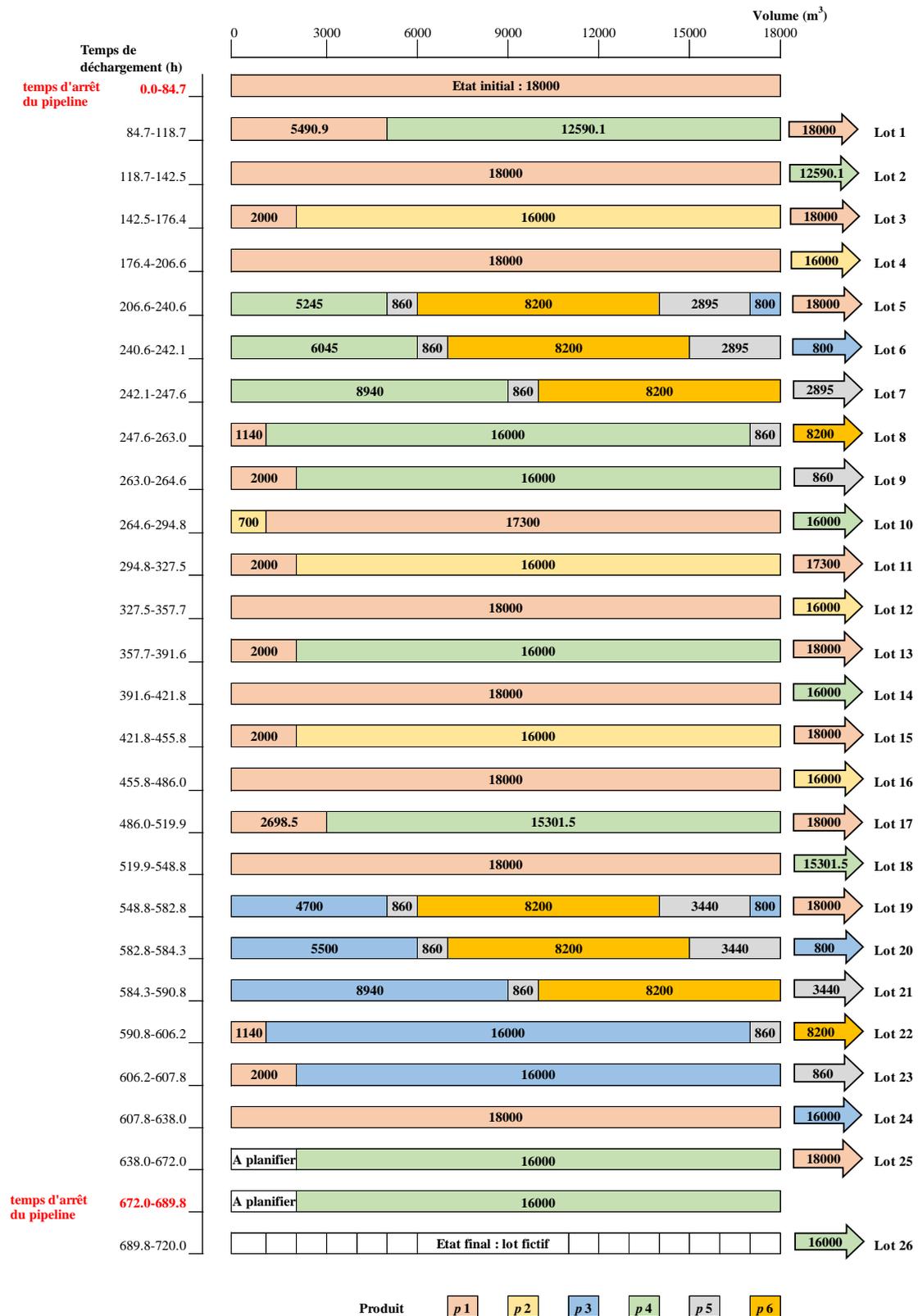


Figure 3.18 : Ordonnancement des lots obtenu après l'évaluation au plus tard

3.2.4.2 Procédure d'amélioration locale - exemple

a. Application de la méthode d'amélioration P1

En se basant sur l'instance (ER1), la méthode d'amélioration P1 est appliquée à la solution initiale obtenue à la section précédente. Le Tableau 3.10 illustre le détail de modification des volumes de lots après l'exécution de la méthode P1. Les colonnes 1 et 2 du tableau représentent la séquence des lots pour les deux solutions, avant et après application de la méthode. De plus, les colonnes 3 et 4 illustrent le détail de modification des volumes des lots. Enfin, la dernière colonne porte sur l'écart entre le volume de chaque lot des deux solutions : l'écart positif entre deux lots signifie que le volume du lot de la solution initiale a été augmenté ; l'écart négatif entre deux lots renvoie à une réduction du volume du lot de la solution initiale.

D'après le Tableau 3.10, les volumes des lots réduits sont obtenus après l'étape 1 de cette méthode d'amélioration. Cette étape permet de rechercher les lots qui induisent des temps d'arrêts du pipeline en appliquant l'évaluation au plus tôt. En se référant à la Figure 3.17, on remarque le premier lot qui provoque un arrêt du pipeline est le lot 7, comportant le produit 5 et possédant un volume initial de $2895.0 m^3$. Le volume de ce lot est réduit dans un premier temps du volume déchargé après le temps d'arrêt, qui vaut $281.3 m^3$.

Après l'application de l'évaluation au plus tôt, il est constaté que le second lot qui induit un temps d'arrêt du pipeline est le lot 9, contenant le produit 5 et ayant le volume minimum ($860.0 m^3$) (voir Figure 3.17). Puisque le lot 9 ne peut pas être réduit, alors les volumes déchargés après les deux temps d'arrêt causés par ce lot sont retranchés du lot qui le précède : dans ce cas, il s'agit du lot 7. De ce fait, le volume du lot 7 est diminué une seconde fois de $2 * 286.7 m^3$. Au total, le volume réduit du lot 7 est de : $281.3 + 2 * 286.7 = 851.7 m^3$. L'étape 1 de la méthode P1 est exécutée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de possibilité de réduire les temps d'arrêt du pipeline.

Il faut noter que plusieurs lots ont été réduits à la fin de cette étape, mais seulement les lots 7 et 21 restent diminués après la méthode P1, d'après le Tableau 3.10. Ceci revient au fait que les volumes des autres lots réduits sont augmentés de nouveau lors de l'étape 2 de cette procédure.

L'étape 2 de la méthode d'amélioration P1 consiste à augmenter les volumes des lots au maximum possible, dans l'ordre chronologique inverse, sans pour autant introduire de nouveaux temps d'arrêt du pipeline. Comme le montre le Tableau 3.10, deux lots ont été augmentés pour atteindre leur volume maximum : il s'agit des lots 11 et 18. De plus, trois lots ont connu une augmentation de leur volume sans engendrer d'arrêt supplémentaire du pipeline : ce sont les lots 2, 20 et 23.

Après l'application de la méthode P1, le volume total est augmenté de $4629.3 m^3$, ce qui représente une augmentation du taux de remplissage du pipeline de 85.76% à 86.97%.

Tableau 3.10 : Application de la méthode d’amélioration P1

| Numéro de lot i | Produit p | Volume des lots (m^3) | | Volume ajouté / réduit ($Qp1_i - Qinit_i$) (m^3) |
|---|-------------|-------------------------------|--|--|
| | | $Qinit_i$ (solution initiale) | $Qp1_i$ (solution après la méthode P1) | |
| 1 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 2 | 4 | 12590.1 | 14040.0 | 1449.9 |
| 3 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 4 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 5 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 6 | 3 | 800.0 | 800.0 | 0.0 |
| 7 | 5 | 2895.0 | 2043.3 | -851.7 |
| 8 | 6 | 8200.0 | 8200.0 | 0.0 |
| 9 | 5 | 860.0 | 860.0 | 0.0 |
| 10 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 11 | 1 | 17300.0 | 18000.0 | 700.0 |
| 12 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 13 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 14 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 15 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 16 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 17 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 18 | 4 | 15301.5 | 16000.0 | 698.5 |
| 19 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 20 | 3 | 800.0 | 2286.0 | 1486.0 |
| 21 | 5 | 3440.0 | 3153.3 | -286.7 |
| 22 | 6 | 8200.0 | 8200.0 | 0.0 |
| 23 | 5 | 860.0 | 2293.3 | 1433.3 |
| 24 | 3 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 25 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 26 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| Volume total augmenté (m^3) | | | | 4629.3 |
| <hr/> | | | | |
| Critère T1 : volume total transporté (m^3) | | 327246.6 | 331876.0 | |
| Taux de remplissage du pipeline | | 85.76% | 86.97% | |
| Temps d'arrêt total du pipeline (h) | | 102.6 | 93.8 | |
| Critère T2 : coût du volume contaminé (m^3) | | 5000.0 | 5000.0 | |
| Fonction objectif = T1 – T2 | | 322246.6 | 326876.0 | |

b. Application de la méthode d’amélioration P2 – itération 1

Le principe de la deuxième méthode d’amélioration P2 consiste à réarranger les volumes des lots. La méthode P2 commence par la recherche des produits possédant des volumes qui peuvent être réarrangés : les produits 3, 4 et 5 ont été identifiés pour la solution obtenue à la section précédente. Par la suite, on cherche à trier les volumes des lots pour chaque produit par ordre croissant, noté « C », ou décroissant, noté « D ». Pour cela, un codage composé du

numéro d'un produit et de l'ordre de tri (« C » ou « D ») est utilisé. Les nœuds associés aux codages en principe possibles sont représentés comme suit :

- pour le produit 5 : #5:D# et #5:C# ;
- pour le produit 4 : #4 :D# et #4 :C# ;
- pour le produit 3 : #3 :D# et #3 :C#.

Cependant, nous constatons, d'après le Tableau 3.11, que les lots i de la solution après la méthode P1, comportant les produits 3 et 4, possèdent des volumes $Qp1_i$ déjà classés par ordre croissant :

- Pour le produit 3 : {(lot 6, $Qp1_6 = 800m^3$), (lot 20, $Qp1_{20} = 2246m^3$), (lot 24, $Qp1_{24} = 16000m^3$)}
- Pour le produit 4 : {(lot 2, $Qp1_2 = 14040m^3$), (lot 10, $Qp1_{10} = 16000m^3$), (lot 14, $Qp1_{14} = 16000m^3$), (lot 18, $Qp1_{18} = 16000m^3$), (lot 26, $Qp1_{26} = 16000m^3$)}

Par conséquent, les chemins possibles à explorer sont formés à partir des combinaisons entre les nœuds suivants : #5 :D#, #5 :C#, #4 :D# et #3 :D#. Puisque deux nœuds comportant le même produit ne peuvent pas figurer sur un seul chemin, alors le nombre de chemins possibles est 26. Par exemple, l'arbre d'énumération pour le produit 3 avec un tri décroissant est illustré par la Figure 3.19, et les chemins obtenus sont listés comme suit :

- chemin 1 : (#3:D#) ;
- chemin 2 : (#3:D# → #4:D#) ;
- chemin 3 : (#3:D# → #5:D#) ;
- chemin 4 : (#3:D# → #5:C#) ;
- chemin 5 : (#3:D# → #4:D# → #5:D#) ;
- chemin 6 : (#3:D# → #4:D# → #5:C#) ;
- chemin 7 : (#3:D# → #5:D# → #4:D#) ;
- chemin 8 : (#3:D# → #5:C# → #4:D#).

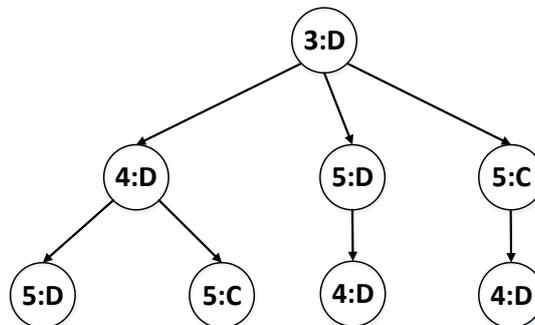


Figure 3.19 : Arbre d'énumération du produit 3 avec un tri décroissant « D »

Après chaque chemin exploré, l’étape 2 de la méthode d’amélioration P1 est appliquée, consistant à réaliser toute augmentation possible du volume des lots, sans provoquer de nouveaux arrêts du pipeline.

A partir de la solution obtenue après la méthode P1, et en appliquant la méthode P2, un chemin est trouvé qui permet une augmentation du volume d’un lot sans induire de temps d’arrêt du pipeline. En effet, il s’agit du chemin (#5:D# → #3:D#) permettant d’effectuer un tri décroissant des lots comportant le produit 5, puis un tri décroissant des lots contenant le produit 3. La Figure 3.20 et la Figure 3.21 illustrent le détail des opérations de transfert de volume, selon le tri décroissant, effectuées aux lots qui contiennent le produit 5 (lots 7, 21 et 23) et 3 (lot 6, 20 et 24) respectivement. Les volumes des lots après le tri décroissant figurent au côté droit de chaque figure.

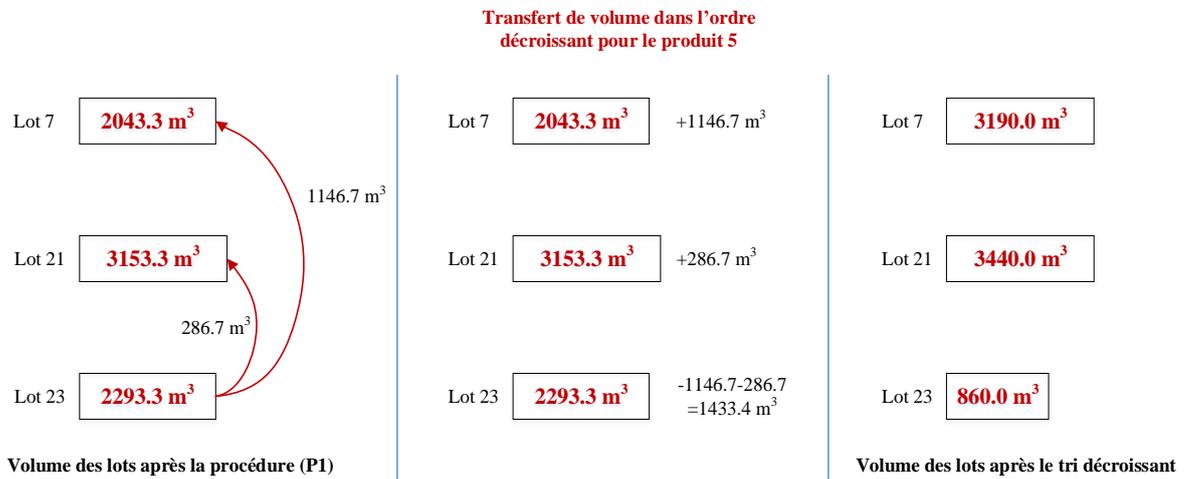


Figure 3.20 : Transfert de volume selon le tri décroissant appliqué aux lots comportant le produit 5

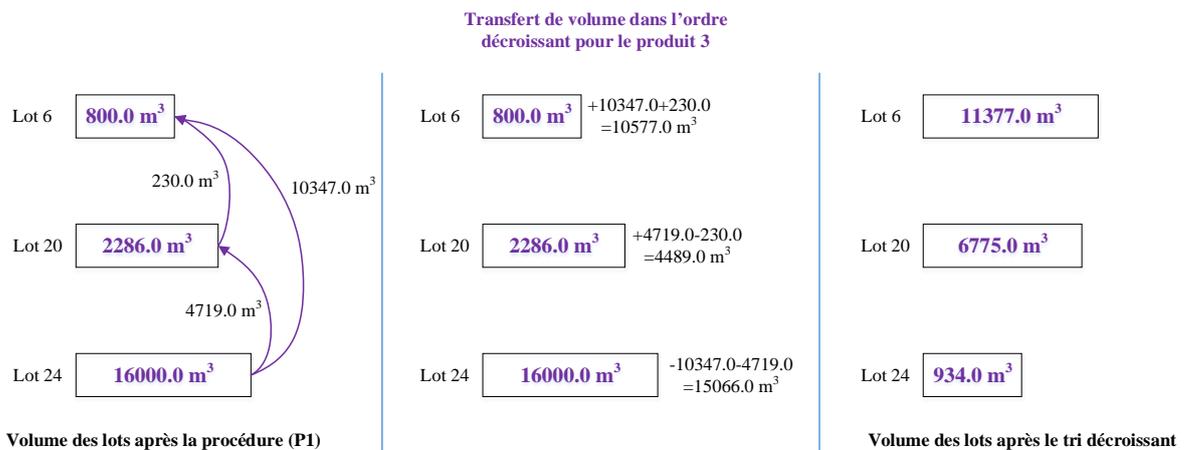


Figure 3.21 : Transfert de volume selon le tri décroissant appliqué aux lots comportant le produit 3

Par la suite, en appliquant l'étape 2 de la méthode d'amélioration P1, le volume du lot 23 est augmenté de $286.7 m^3$, sans créer de nouveaux arrêts du pipeline. En effet, le volume du lot 23 à la fin du tri décroissant égale à $860.0 m^3$ (voir Figure 3.21). Après l'augmentation du volume de ce lot, celui-ci devient : $860.0 + 286.7 = 1146.7 m^3$.

Le Tableau 3.11 illustre le détail de modification en appliquant la méthode P2. Une augmentation de $286.7 m^3$ de volume est réalisée après l'application de cette méthode, qui donne une augmentation du taux de remplissage du pipeline de 86.97% à 87.04%.

Tableau 3.11 : Application de la méthode d'amélioration P2

| Lot i | Produit p | Volume des lots (m^3) | | Volume ajouté / réduit ($Qp2_i - Qp1_i$) (m^3) |
|---|-------------|--|--|--|
| | | $Qp1_i$ (solution après la méthode P1) | $Qp2_i$ (solution après la méthode P2) | |
| 1 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 2 | 4 | 14040.0 | 14040.0 | 0.0 |
| 3 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 4 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 5 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 6 | 3 | 800.0 | 11377.0 | 10577.0 |
| 7 | 5 | 2043.3 | 3190.0 | 1146.7 |
| 8 | 6 | 8200.0 | 8200.0 | 0.0 |
| 9 | 5 | 860.0 | 860.0 | 0.0 |
| 10 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 11 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 12 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 13 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 14 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 15 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 16 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 17 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 18 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 19 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 20 | 3 | 2286.0 | 6775.0 | 4489.0 |
| 21 | 5 | 3153.3 | 3440.0 | 286.7 |
| 22 | 6 | 8200.0 | 8200.0 | 0.0 |
| 23 | 5 | 2293.3 | 1146.7 | -1146.7 |
| 24 | 3 | 16000.0 | 934.0 | -15066.0 |
| 25 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 26 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| Volume total augmenté (m^3) | | | | 286.7 |
| Critère T1 : volume total transporté (m^3) | | 331876.0 | 332162.7 | |
| Taux de remplissage du pipeline | | 86.97% | 87.04% | |
| Temps d'arrêt total du pipeline (h) | | 93.8 | 93.3 | |
| Critère T2 : coût du volume contaminé (m^3) | | 5000.0 | 5000.0 | |
| Fonction objectif = T1 - T2 | | 326876.0 | 327162.7 | |

c. Application de la méthode d’amélioration P3 – itération 1

La première étape de la méthode P3 cherche à transférer le volume entre deux lots contenant de même produit. Le Tableau 3.12 illustre le détail des volumes transférés. Nous constatons, d’après ce tableau, que les lots dont le volume est réduit ou augmenté comportent les produits 3 et 4. De plus, pour ces produits, le volume est déplacé depuis les lots figurant en bas de la séquence jusqu’à ceux se trouvant au début de la séquence.

Tableau 3.12 : Première étape de la méthode d’amélioration P3

| Lot i | Produit p | Volume des lots (m^3) | | Volume ajouté / réduit ($Qe1p3_i - Qp2_i$) (m^3) |
|---|-------------|--|---|--|
| | | $Qp2_i$ (solution après la méthode P2) | $Qe1p3_i$ (solution après l’étape 1 de la méthode P3) | |
| 1 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 2 | 4 | 14040.0 | 16000.0 | 1960.0 |
| 3 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 4 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 5 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 6 | 3 | 11377.0 | 11614.0 | 237.0 |
| 7 | 5 | 3190.0 | 3190.0 | 0.0 |
| 8 | 6 | 8200.0 | 8200.0 | 0.0 |
| 9 | 5 | 860.0 | 860.0 | 0.0 |
| 10 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 11 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 12 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 13 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 14 | 4 | 16000.0 | 15763.0 | -237.0 |
| 15 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 16 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 17 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 18 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 19 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 20 | 3 | 6775.0 | 6672.0 | -103.0 |
| 21 | 5 | 3440.0 | 3440.0 | 0.0 |
| 22 | 6 | 8200.0 | 8200.0 | 0.0 |
| 23 | 5 | 1146.7 | 1146.7 | 0.0 |
| 24 | 3 | 934.0 | 800.0 | -134.0 |
| 25 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 26 | 4 | 16000.0 | 14277.0 | -1723.0 |
| Volume total ajouté (m^3) | | | | 0.0 |
| Critère T1 : volume total transporté (m^3) | | 332162.7 | 332162.7 | |
| Taux de remplissage du pipeline | | 87.04% | 87.04% | |
| Temps d'arrêt total du pipeline (h) | | 93.3 | 93.3 | |
| Critère T2 : coût du volume contaminé (m^3) | | 5000.0 | 5000.0 | |
| Fonction objectif = T1 – T2 | | 327162.7 | 327162.7 | |

Par la suite, la seconde étape de la méthode P3 est exécutée, qui cherche à effectuer des transferts de volume entre les lots contenant un même produit, puis à et augmenter, si possible, le volume des lots, dans l'ordre chronologique descendant, sans introduire de nouveaux arrêts du pipeline.

Le résultat obtenu après l'application de l'étape 2 est représenté dans le Tableau 3.13. A partir de celui-ci, on constate que le déplacement des volumes s'effectue dans le sens opposé de celui réalisé dans l'étape 1 de la méthode P3 : c'est-à-dire des lots se trouvant au début de la séquence jusqu'aux lots se situant en bas de la séquence. Le transfert des volumes s'effectue entre les lots comportant les produits 3, 4 et 5. Cependant, il est remarqué qu'aucune augmentation de volume n'a été possible, vu que le volume total ajouté est nul. Par conséquent, il n'y a pas d'amélioration de la solution après l'application de la méthode (P3).

Tableau 3.13 : Deuxième étape de la méthode d’amélioration P3

| Lot i | Produit p | Volume des lots (m^3) | | Volume ajouté / réduit ($Qe2p3_i - Qe1p3_i$) (m^3) |
|---|-------------|---|---|--|
| | | $Qe1p3_i$ (solution après l'étape 1 de la procédure P3) | $Qe2p3_i$ (solution après l'étape 2 de la procédure P3) | |
| 1 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 2 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 3 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 4 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 5 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 6 | 3 | 11614.0 | 2286.0 | -9328.0 |
| 7 | 5 | 3190.0 | 896.7 | -2293.3 |
| 8 | 6 | 8200.0 | 8200.0 | 0.0 |
| 9 | 5 | 860.0 | 860.0 | 0.0 |
| 10 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 11 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 12 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 13 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 14 | 4 | 15763.0 | 14040.0 | -1723.0 |
| 15 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 16 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 17 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 18 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 19 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 20 | 3 | 6672.0 | 16000.0 | 9328.0 |
| 21 | 5 | 3440.0 | 3440.0 | 0.0 |
| 22 | 6 | 8200.0 | 8200.0 | 0.0 |
| 23 | 5 | 1146.7 | 3440.0 | 2293.3 |
| 24 | 3 | 800.0 | 800.0 | 0.0 |
| 25 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 26 | 4 | 14277.0 | 16000.0 | 1723.0 |
| Volume total ajouté (m^3) | | | | 0.0 |
| Critère T1 : volume total transporté (m^3) | | 332162.7 | 332162.7 | |
| Taux de remplissage du pipeline | | 87.04% | 87.04% | |
| Temps d'arrêt total du pipeline (h) | | 93.3 | 93.3 | |
| Critère T2 : coût du volume contaminé (m^3) | | 5000.0 | 5000.0 | |
| Fonction objectif = T1 – T2 | | 327162.7 | 327162.7 | |

d. Application de la méthode d’amélioration P2 – itération 2

Une seconde application de la méthode P2 est effectuée à la solution obtenue, afin de tester si une amélioration est encore possible. Le résultat fourni après la nouvelle application de la méthode d’amélioration P2 est similaire au précédent : la valeur de la fonction objectif obtenue est égale à celle fournie par l’application de la méthode P3 à l’itération 1, puisqu’il n’y a eu

aucune augmentation possible du volume des lots. Par conséquent, le critère d'arrêt de la procédure d'amélioration est activé : l'enchaînement des deux méthodes P2 et P3 s'arrête.

3.2.4.3 Comparaison avec le modèle linéaire proposé

La solution améliorée est comparée avec celle obtenue par le modèle linéaire présenté au chapitre 2. Le modèle proposé considère la séquence des lots fournie par la méthode de construction comme paramètre d'entrée, en fixant la valeur des variables binaires $y_{i,p}$, et optimise le volume des lots en maximisant la fonction objectif (T1-T2). De ce fait, le couplage entre la méthode de construction et le modèle linéaire forme une méthode hybride. Celle-ci a été présentée à la conférence internationale IFAC MIM en 2019 (Bamoumen et *al.*, 2019).

La solution obtenue par la méthode d'amélioration et celle fournie par le modèle linéaire sont représentées dans le Tableau 3.14. D'après celui-ci, on remarque que la méthode d'amélioration permet d'obtenir la même fonction objectif que celle fournie par le modèle linéaire, puisque la différence totale de volume est nulle. Cependant, les deux solutions ne comportent pas le même volume pour les lots suivants :

- pour le produit 4 : lots 2 et 14 ;
- pour le produit 3 : lots 6 et 20 ;
- pour le produit 5 : lots 7 et 23.

Tableau 3.14 : Comparaison entre la solution obtenue après la méthode d’amélioration et celle obtenue par le modèle linéaire

| Lot i | Produit p | Volume des lots (m^3) | | Différence de volume ($Q_{ma_i} - Q_{ml_i}$) (m^3) |
|---|-------------|-------------------------------------|------------------------------|--|
| | | Q_{ma_i} (méthode d’amélioration) | Q_{ml_i} (modèle linéaire) | |
| 1 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 2 | 4 | 16000.0 | 14040.0 | 1960.0 |
| 3 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 4 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 5 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 6 | 3 | 2286.0 | 11147.0 | -8861.0 |
| 7 | 5 | 896.7 | 2875.7 | -1979.0 |
| 8 | 6 | 8200.0 | 8200.0 | 0.0 |
| 9 | 5 | 860.0 | 860.0 | 0.0 |
| 10 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 11 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 12 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 13 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 14 | 4 | 14040.0 | 16000.0 | -1960.0 |
| 15 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 16 | 2 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 17 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 18 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| 19 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 20 | 3 | 16000.0 | 7139.0 | 8861.0 |
| 21 | 5 | 3440.0 | 3440.0 | 0.0 |
| 22 | 6 | 8200.0 | 8200.0 | 0.0 |
| 23 | 5 | 3440.0 | 1461.0 | 1979.0 |
| 24 | 3 | 800.0 | 800.0 | 0.0 |
| 25 | 1 | 18000.0 | 18000.0 | 0.0 |
| 26 | 4 | 16000.0 | 16000.0 | 0.0 |
| Différence de volume totale (m^3) | | | | 0.0 |
| Critère T1 : volume total transporté (m^3) | | 332162.7 | 332162.7 | |
| Taux de remplissage du pipeline | | 87.04% | 87.04% | |
| Temps d'arrêt total du pipeline (h) | | 93.3 | 93.3 | |
| Critère T2 : coût du volume contaminé (m^3) | | 5000.0 | 5000.0 | |
| Fonction objectif = T1 – T2 | | 327162.7 | 327162.7 | |

La méthode approchée proposée peut être adaptée pour l’étude du problème d’ordonnancement du réseau de pipelines OCP, lorsque celui-ci opère pour répondre à deux demandes au plus. Comme souligné au chapitre 2, cette adaptation se base, de manière similaire, sur la modification des paramètres suivants : le temps de stabilisation, qui doit être nul pour tenir en compte, dans la fonction d’évaluation, des opérations simultanées de remplissage et de soutirage des bacs de stockage ; et la matrice de compatibilité des produits pour prendre en considération la séparation des lots comportant les produits de phosphate.

3.3 Expérimentations numériques

Cette section porte sur la présentation des résultats fournis par le GRASP-like proposé. Ces résultats sont obtenus en se basant sur les 129 instances générées et utilisées par le modèle linéaire dans le chapitre 2. La méthode approchée est implémentée en Java (JDK 1.8) en utilisant l'environnement de développement intégré NetBeans (version 8.2), et le nombre de thread est fixé à 1.

La section est organisée en trois parties : la sous-section (3.3.1) porte sur l'étude de la convergence et de la divergence du GRASP-like proposé ; la sous-section (3.3.2) se focalise sur l'étude de la performance de la méthode d'amélioration ; finalement, les sous-sections (3.3.3) et (3.3.4) concernent l'analyse de la performance du GRASP-like en comparaison avec le modèle linéaire présenté dans le chapitre 2.

3.3.1 Divergence et convergence du GRASP-like proposé

Dans cette partie, l'étude de la qualité du GRASP-like proposé est effectuée en considérant les critères suivants : la divergence et la convergence. La divergence est mesurée en termes de nombre de solution différentes générées par l'heuristique de construction, et la convergence est analysée par rapport au nombre d'itérations nécessaires pour trouver la meilleure solution. Pour chaque critère, la moyenne et l'écart-type sont calculés pour 5 exécutions de l'heuristique.

Le Tableau 3.15 illustre la divergence (nombre de solutions différentes) et la convergence (nombre d'itérations pour obtenir la meilleure solution) du GRASP-like. Les instances sont organisées en 12 groupes, chacun de ces derniers contient 10 instances. D'après le Tableau 3.15, nous remarquons que, pour les instances avec un horizon de 8 jours et 4 produits, l'heuristique de construction explore un nombre limité de solutions, avec une moyenne de 31.4 solutions différentes sur 500 itérations. Ceci peut s'expliquer par le faible nombre de produits (4 produits) et par la courte longueur de l'horizon de planification (8 jours), qui ne permettent pas d'obtenir des combinaisons différentes lors de la construction des solutions. En revanche, cette moyenne dépasse 400 solutions distinctes sur 500 itérations pour les instances avec un horizon de planification de 30 jours.

L'heuristique de construction permet ainsi de fournir des solutions réalisables en garantissant une bonne diversification pour la majorité des instances. En effet, le nombre de solutions différentes dépend du critère de sélection pour la création de la liste des candidats « RCL_list ». Ce critère correspond à la différence entre l'autonomie du stock des produits et l'autonomie la plus faible, et il est fixé dans toute l'étude à 72 heures. Plus le critère de sélection est grand, plus le nombre de solutions distinctes augmente.

Par ailleurs, il est constaté que la moyenne des itérations pour obtenir la meilleure solution est inférieure à 200 pour toutes les instances. Cependant, la moyenne de l'écart-type reste assez

grande pour la plupart des instances. C’est pourquoi, le nombre d’itérations du GRASP-like pour chaque exécution est défini à 500.

Tableau 3.15 : Divergence / Convergence du GRASP-like proposé

| Horizon de planification | Nombre de produits | Nombre de solutions différentes | | Meilleure itération | |
|--------------------------|--------------------|---------------------------------|------------|---------------------|------------|
| | | Moyenne | Ecart-type | Moyenne | Ecart-type |
| 8 | 4 | 31.4 | 14.0 | 12.2 | 21.3 |
| | 5 | 110.4 | 46.8 | 30.0 | 53.4 |
| | 6 | 121.2 | 48.4 | 72.9 | 103.2 |
| 14 | 4 | 127.6 | 43.1 | 96.9 | 110.1 |
| | 5 | 355.0 | 64.1 | 133.2 | 129.2 |
| | 6 | 336.0 | 69.4 | 159.6 | 106.0 |
| 21 | 4 | 341.1 | 78.5 | 114.9 | 123.9 |
| | 5 | 468.3 | 13.9 | 166.1 | 116.1 |
| | 6 | 438.0 | 32.6 | 184.3 | 125.9 |
| 30 | 4 | 403.5 | 43.9 | 105.8 | 120.4 |
| | 5 | 472.8 | 14.8 | 147.6 | 120.7 |
| | 6 | 253.5 | 93.2 | 121.9 | 132.2 |

3.3.2 Configuration de la procédure d’amélioration locale

En vue de tester la qualité de la procédure d’amélioration, les trois méthodes d’amélioration présentées dans la section (3.2.3) sont combinées de façon à obtenir 8 enchaînements. Par la suite, parmi les 9 instances générées dans la sous-section (2.5.4.2) du chapitre 2, l’instance 7 avec un horizon de 30 jours et 6 produits est considérée, et l’heuristique est exécutée 5 fois en utilisant chaque enchaînement. Pour chaque exécution de l’heuristique, 500 solutions sont générées et améliorées. L’objectif est de choisir l’enchaînement de procédures qui permet de fournir la meilleure solution en un temps de calcul raisonnable.

Les résultats de la meilleure exécution de la méthode approchée, en considérant chaque enchaînement des procédures, sont présentés dans le Tableau 3.16. Chaque ligne du tableau correspond à la meilleure solution fournie par l’enchaînement de procédure associé. Les deux dernières lignes du tableau représentent respectivement les moyennes du GAP et du temps de calcul pour les enchaînements de cette exécution, ainsi que celles correspondant aux 5 exécutions du GRASP-like. Pour cette exécution, la comparaison entre ces solutions s’effectue en considérant les éléments suivants :

- « GAP » : le GAP de la fonction objectif par rapport à ceux de la solution fournie par le modèle linéaire pour l’instance 7 (colonnes 5) ;
- « CPU time » : le temps de résolution (colonne 6).

A partir du Tableau 3.16, nous constatons qu'il existe des différences au niveau du GAP et du temps de calcul : les enchaînements (P2→P1→P3), (P2→P3→P1) et (P3→P2→P1) requiert un temps de résolution qui dépasse 8 minutes, contrairement aux autres combinaisons de procédures dont le temps de calcul est inférieur à 3 minutes. En outre, ils fournissent des solutions dont le GAP (1.04%) est supérieur à ceux des autres enchaînements (0.63%). C'est pourquoi, ces trois enchaînements ne sont pas considérés pour évaluer la performance de la méthode approchée par la suite.

Par ailleurs, nous avons observé, comme l'illustre l'exemple présenté dans de la section (3.2.4.2), que la procédure P1 permet d'apporter une grande amélioration à la solution initiale si elle est exécutée en premier. De ce fait, les deux combinaisons de procédures retenues sont : (P1→P2→P3) et (P1→P3→P2). Pour ces dernières, un rebouclage est réalisé sur les procédures P2 et P3 jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'amélioration possible.

Les résultats obtenus sont intégrés dans les lignes 9 et 10 du Tableau 3.16. On constate que l'enchaînement (P1 → boucle(P2 → P3)) permet de fournir une solution meilleure que l'enchaînement (P1→boucle(P3→P2)), avec un GAP qui vaut 0.43%. De plus, la différence de temps de résolution entre les deux combinaisons ne dépasse pas 1 minute. Par conséquent, l'enchaînement retenu dans la méthode d'amélioration pour mesurer la performance de l'heuristique dans le reste de cette section est : (P1→boucle(P2→P3)).

Tableau 3.16 : Résultats des enchaînements de procédures d'amélioration pour la nouvelle instance 7 avec 30 jours et 6 produits

| Enchaînement des procédures | Méthode approchée proposée | | | | |
|---------------------------------|----------------------------|----------|--------|--------------|--------------|
| | Obj. val. | T1 | T2 | GAP | CPU time (s) |
| P1→P2→P3 | 371111.3 | 377311.3 | 6200.0 | 0.63% | 144.0 |
| P1→P3→P2 | 371111.3 | 377311.3 | 6200.0 | 0.63% | 146.8 |
| P2→P1→P3 | 369573.7 | 375773.7 | 6200.0 | 1.04% | 533.3 |
| P2→P3→P1 | 369573.7 | 375773.7 | 6200.0 | 1.04% | 551.2 |
| P3→P1→P2 | 371111.3 | 377311.3 | 6200.0 | 0.63% | 149.1 |
| P3→P2→P1 | 369573.7 | 375773.7 | 6200.0 | 1.04% | 528.6 |
| P1→boucle(P3→P2) | 371111.3 | 377311.3 | 6200.0 | 0.63% | 145.1 |
| P1→boucle(P2→P3) | 371851.0 | 378051.0 | 6200.0 | 0.43% | 199.5 |
| Moyenne | | | | 0.76% | 299.6 |
| Moyenne des 5 exécutions | | | | 0.90% | 299.2 |

3.3.3 Performance de la procédure d’amélioration locale

Le Tableau 3.17 illustre la performance de la méthode d’amélioration en se basant sur le groupe des 10 instances avec un horizon de planification de 30 jours et 6 produits. Pour chaque instance, 9 solutions initiales différentes sont créées à l’aide de l’heuristique de construction. Le modèle linéaire présenté dans le chapitre 2 est utilisé en fixant la séquence des lots prise des solutions initiales pour optimiser uniquement le volume de lots.

Comme le montre le Tableau 3.17, l’écart moyen des solutions initiales est de 2.9 % par rapport à celles du modèle linéaire. La procédure d’amélioration est appliquée pour chaque solution initiale, et elle permet d’obtenir 88 solutions optimales (c’est-à-dire celles du modèle linéaire) sur 90 (voir colonne 4). Seules 2 solutions de l’instance 1 sont quasi optimales avec respectivement un GAP de 0.017% et 0.072%, et l’écart moyen de l’instance 1 est arrondi à 0.01%. En ce qui concerne le temps de calcul, la méthode d’amélioration s’exécute de manière très rapide, et nécessite en moyenne 0.11 seconde avec 1 thread, tandis que le modèle linéaire est résolu en utilisant un nombre de threads limité à 64, avec une moyenne de 9.42 secondes.

Tableau 3.17 : Performance de la méthode d’amélioration

| Inst. | Solution initiale | Modèle linéaire | Méthode d’amélioration | | |
|------------------|-------------------|------------------|------------------------|--------------|------------------|
| | Avg GAP | Avg CPU Time (s) | Nb of best sol | Avg GAP | Avg CPU Time (s) |
| 1 | 3.05% | 10.8 | 7 | 0.01% | 0.20 |
| 2 | 2.46% | 4.1 | 9 | 0.00% | 0.07 |
| 3 | 2.09% | 1.9 | 9 | 0.00% | 0.06 |
| 4 | 3.87% | 4.3 | 9 | 0.00% | 0.13 |
| 5 | 2.81% | 9.6 | 9 | 0.00% | 0.08 |
| 6 | 2.73% | 15.4 | 9 | 0.00% | 0.18 |
| 7 | 2.91% | 4.5 | 9 | 0.00% | 0.11 |
| 8 | 2.99% | 19.4 | 9 | 0.00% | 0.13 |
| 9 | 3.26% | 10.7 | 9 | 0.00% | 0.07 |
| 10 | 2.85% | 13.6 | 9 | 0.00% | 0.05 |
| Moyenne : | 2.90% | 9.42 | 8.8 | 0.001% | 0.11 |

3.3.4 Performance de la méthode approchée

La performance du GRASP-like proposé est évaluée par rapport au modèle linéaire présenté dans le chapitre 2, en se basant sur les 129 instances générées dans le même chapitre. Par rappel, le temps de résolution du modèle linéaire a été limité à 24 heures.

Tout d'abord, la performance de la méthode approchée est mesurée, d'après le Tableau 3.18, d'un point de vue global, en fonction des critères suivants :

- « best GAP » (colonne 4) : le GAP moyen de la meilleure exécution de l'heuristique ;
- « average GAP » (colonne 5) : la moyenne des GAP moyens obtenus pour les 5 exécutions de l'heuristique ;
- « average GAP » de T1 et de T2 (colonne 6 et 7) : la moyenne des GAP moyens des critères T1 et T2 qui composent la fonction objectif ;
- « average CPU time » (colonne 8) : la moyenne des temps de calcul moyens pour les 5 exécutions de l'heuristique.

En comparaison avec le modèle linéaire, il est remarqué que le GRASP-like proposé fournit des solutions avec une faible moyenne de GAP qui vaut 0.09%. De plus, le GAP moyen des deux critères de la fonction objectif est analysé : le GAP moyen du critère T1 montre que la valeur optimale est atteinte pour 9 groupes d'instances sur 12, et possède une moyenne de 0.05% ; le GAP moyen de T2 illustre que la différence majeure concerne le nombre de lots lorsque les solutions du GRASP-like proposé sont comparées à celles du modèle linéaire. Il est intéressant de noter que des valeurs négatives peuvent être obtenues dans le GAP moyen de T2, ce qui signifie que la méthode approchée construit des solutions comportant un nombre de lots plus faible que celui des solutions obtenues par le modèle linéaire.

Concernant le temps de calcul, il est remarqué que le modèle linéaire requiert un temps de résolution légèrement plus faible que le GRASP-like pour les instances avec un horizon de planification de 8 jours. Cependant, en ce qui concerne les autres instances, nous constatons, d'un côté, que le temps de calcul augmente de manière exponentielle pour le modèle linéaire, en fonction de la longueur de l'horizon de planification. D'un autre côté, le temps de résolution du GRASP-like s'accroît de façon linéaire en fonction de longueur de l'horizon de planification. Par conséquent, la méthode approchée est considérée plus efficace en termes de temps de résolution, notamment pour les instances avec un horizon de 30 jours.

Tableau 3.18 : Performance de la méthode approchée pour les instances générées

| Horizon de planification (jours) | Nombre de produits | Modèle linéaire | Méthode approchée | | | | |
|----------------------------------|--------------------|-----------------|-------------------|---------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| | | CPU time (s) | Best GAP | Avg GAP | Avg GAP _{T1} | Avg GAP _{T2} | Avg CPU time (s) |
| | 4 | 0.8 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 1.1 |
| 8 | 5 | 0.9 | 0.04% | 0.04% | 0.00% | 3.67% | 1.6 |
| | 6 | 0.9 | 0.04% | 0.06% | 0.00% | 5.00% | 1.9 |
| 14 | 4 | 7.1 | 0.02% | 0.02% | 0.00% | 2.20% | 2.8 |
| | 5 | 11.6 | 0.02% | 0.04% | 0.00% | 3.40% | 5.1 |
| | 6 | 23.9 | 0.07% | 0.08% | 0.00% | 6.63% | 7.9 |
| 21 | 4 | 13381.5 | 0.09% | 0.10% | 0.09% | 1.21% | 9.2 |
| | 5 | 159.6 | 0.06% | 0.07% | 0.00% | 6.19% | 12.8 |
| | 6 | 267.6 | 0.05% | 0.09% | 0.00% | 6.22% | 23.6 |
| 30 | 4 | 11228.4 | 0.41% | 0.42% | 0.41% | -0.03% | 18.9 |
| | 5 | 33683.8 | 0.09% | 0.10% | 0.08% | 1.43% | 34.8 |
| | 6 | 43194.4 | 0.09% | 0.09% | 0.00% | 6.30% | 73.6 |
| Moyenne : | | | 0.08% | 0.09% | 0.05% | 3.52% | |

Le Tableau 3.19 et le Tableau 3.20 fournissent les résultats de la meilleure exécution du GRASP-like pour deux groupes d’instances avec respectivement 6 et 4 produits et un horizon de planification de 30 jours. Chaque groupe contient 10 instances numérotées de 1 à 10. La performance de la méthode approchée est évaluée en comparaison avec le modèle linéaire à l’aide de trois indicateurs de performance : le GAP, le nombre d’itérations effectuées pour trouver la meilleure solution et le temps de calcul.

Concernant les instances avec un horizon de planification de 30 jours et 6 produits (voir Tableau 3.19), toutes les valeurs optimales du critère T1 sont atteintes par le GRASP-like proposé en comparaison avec le modèle linéaire. Cependant, la principale différence reste au niveau du critère T2 de la fonction objectif, qui est lié au nombre de lots. Comme le montre le Tableau 3.19, la meilleure solution fournie par le GRASP-like proposé se situe à moins de 100 itérations pour 6 instances, et seulement une instance requiert plus de 400 itérations pour atteindre la meilleure solution. Par rapport au temps de calcul, il est réduit de manière considérable dans le cas des solutions fournies par le GRASP-like. En effet, toutes les instances avec 30 jours et 6 produits nécessitent un temps de résolution inférieur à 2 minutes en effectuant 500 itérations.

Tableau 3.19 : Résultats de la meilleure exécution du GRASP-like pour les instances avec 30 jours et 6 produits

| Inst. | Modèle linéaire | | | | Méthode approchée | | | | | |
|------------------|-----------------|----------|------|----------------|-------------------|-----------------|------|-------|----------|--------------|
| | Obj. val. | T1 | T2 | CPU time (s) | Obj. val. | T1 | T2 | GAP | Best it. | CPU time (s) |
| 1 | 376400.0 | 381600.0 | 5200 | 86400.2 | 376200.0 | 381600.0 | 5400 | 0.1% | 51 | 110.0 |
| 2 | 376800.0 | 381600.0 | 4800 | 13532.2 | 376600.0 | 381600.0 | 5000 | 0.1% | 51 | 41.8 |
| 3 | 376400.0 | 381600.0 | 5200 | 31507.6 | 376200.0 | 381600.0 | 5400 | 0.1% | 353 | 43.7 |
| 4 | 376400.0 | 381600.0 | 5200 | 16940.1 | 376200.0 | 381600.0 | 5400 | 0.1% | 273 | 61.0 |
| 5 | 376000.0 | 381600.0 | 5600 | 80828.4 | 375400.0 | 381600.0 | 6200 | 0.2% | 308 | 64.9 |
| 6 | 376000.0 | 381600.0 | 5600 | 86400.2 | 375400.0 | 381600.0 | 6200 | 0.2% | 409 | 106.5 |
| 7 | 376400.0 | 381600.0 | 5200 | 14187.9 | 376200.0 | 381600.0 | 5400 | 0.1% | 43 | 51.7 |
| 8 | 376400.0 | 381600.0 | 5200 | 13891.5 | 375800.0 | 381600.0 | 5800 | 0.2% | 24 | 86.9 |
| 9 | 376200.0 | 381600.0 | 5400 | 49408.9 | 376000.0 | 381600.0 | 5600 | 0.1% | 68 | 65.0 |
| 10 | 376000.0 | 381600.0 | 5600 | 38846.7 | 375800.0 | 381600.0 | 5800 | 0.1% | 96 | 35.4 |
| Moyenne : | | | | 43194.4 | | | | 0.09% | 167.6 | 66.7 |

Par rapport aux instances avec un horizon temporel de 30 jours et 4 produits, comme l'illustre le Tableau 3.20, le temps de calcul du GRASP-like est très faible par rapport à celui du modèle linéaire, avec une moyenne de 18.7 secondes pour l'heuristique contre 11228.4 (équivalent à 3 heures, 7 minutes et 8 secondes) pour le modèle. De plus, on remarque que, contrairement au modèle linéaire, il n'y a pas de forte fluctuation du temps de résolution observée pour le GRASP-like : toutes les instances considérées requièrent un temps inférieur à 1 minute. Par ailleurs, la valeur optimale du critère T1 est atteinte pour 6 instances, et la solution optimale est trouvée pour 4 instances, avec un GAP moyen de 0.41%. La meilleure solution est obtenue en moins de 100 itérations sur 500 pour 9 instances.

Tableau 3.20 : Résultats de la meilleure exécution du GRASP-like pour les instances avec 30 jours et 4 produits

| Inst. | Modèle linéaire | | | | Méthode approchée | | | | | |
|------------------|-----------------|----------|------|----------------|-------------------|-----------------|-------------|-------------|----------|--------------|
| | Obj. val. | T1 | T2 | CPU time (s) | Obj. val. | T1 | T2 | GAP | Best it. | CPU time (s) |
| 1 | 377200.0 | 381600.0 | 4400 | 191.9 | 377200.0 | 381600.0 | 4400 | 0.0% | 158 | 14.2 |
| 2 | 376800.0 | 381600.0 | 4800 | 5432.4 | 372540.7 | 377140.7 | 4600 | 1.1% | 42 | 27.6 |
| 3 | 377000.0 | 381600.0 | 4600 | 442.7 | 376800.0 | 381600.0 | 4800 | 0.1% | 26 | 11.3 |
| 4 | 376800.0 | 381600.0 | 4800 | 16539.5 | 373450.7 | 378250.7 | 4800 | 0.9% | 89 | 32.3 |
| 5 | 377000.0 | 381600.0 | 4600 | 365.1 | 373868.0 | 378468.0 | 4600 | 0.8% | 1 | 9.6 |
| 6 | 377000.0 | 381600.0 | 4600 | 711.2 | 377000.0 | 381600.0 | 4600 | 0.0% | 40 | 9.1 |
| 7 | 374132.7 | 379132.7 | 5000 | 86400.2 | 369962.7 | 374562.7 | 4600 | 1.1% | 20 | 44.9 |
| 8 | 377200.0 | 381600.0 | 4400 | 166.5 | 377200.0 | 381600.0 | 4400 | 0.0% | 88 | 10.8 |
| 9 | 377000.0 | 381600.0 | 4600 | 309.0 | 377000.0 | 381600.0 | 4600 | 0.0% | 6 | 11.7 |
| 10 | 377000.0 | 381600.0 | 4600 | 1726.1 | 376800.0 | 381600.0 | 4800 | 0.1% | 9 | 15.9 |
| Moyenne : | | | | 11228.4 | | | | 0.41% | 47.9 | 18.7 |

Par ailleurs, le Tableau 3.21 présente les résultats de la meilleure exécution du GRASP-like concernant les 9 instances créées dans la sous-section (2.5.4.2) du chapitre 2, avec un horizon de planification de 30 jours. Les indicateurs de performance du GRASP-like utilisés sont : le GAP par rapport à la solution fournie par le modèle linéaire (colonne 11), le nombre d’itérations nécessaires pour obtenir la meilleure solution (colonne 12) et le temps de calcul (colonne 13).

Nous remarquons que le GRASP-like permet de fournir des solutions de qualité en comparaison avec celles obtenues par le modèle linéaire, avec un GAP maximum inférieur à 2% pour toutes les instances, et une moyenne de 0.77%. De plus, alors que le modèle ne fournit pas des solutions optimales pour ces instances, le GRASP-like parvient à trouver certaines solutions qui sont meilleures, notamment pour les instances 8 et 9, avec un GAP qui respectivement -0.21% et -0.01%. Il est également constaté que la meilleure solution est obtenue en moins de 100 itérations sur 500 pour 5 instances.

Concernant le temps de calcul, il est diminué de manière forte par le GRASP-like proposé. En effet, on observe que toutes les instances requièrent un temps de résolution inférieur à 4 minutes, avec une moyennes de 94.9 secondes (soit 1 minutes et 35 secondes).

Tableau 3.21 : Résultats de la meilleure exécution du GRASP-like pour les nouvelles instances créées avec un horizon de 30 jours

| Inst. | Nombre de produits | Modèle linéaire | | | | | Méthode approchée | | | | | |
|------------------|--------------------|-----------------|----------|------|-------|--------------|-------------------|----------|------|---------------|----------|--------------|
| | | Obj. val. | T1 | T2 | GAP | CPU Time (s) | Obj. val. | T1 | T2 | GAP | Best it. | CPU time (s) |
| 1 | 4 | 367722.7 | 372922.7 | 5200 | 2.44% | 86400.1 | 360499.3 | 365499.3 | 5000 | 1.96% | 14 | 37.3 |
| 2 | 4 | 369865.3 | 375265.3 | 5400 | 1.83% | 86403.2 | 364274.0 | 369274.0 | 5000 | 1.51% | 427 | 40.1 |
| 3 | 4 | 366134.0 | 371734.0 | 5600 | 2.81% | 86403.4 | 362441.0 | 367441.0 | 5000 | 1.01% | 87 | 28.1 |
| 4 | 5 | 372921.0 | 379121.0 | 6200 | 0.89% | 86404.1 | 370265.0 | 376065.0 | 5800 | 0.71% | 480 | 60.7 |
| 5 | 5 | 359507.7 | 365307.7 | 5800 | 4.66% | 86402.0 | 356965.3 | 362565.3 | 5600 | 0.71% | 464 | 53.5 |
| 6 | 5 | 359422.0 | 365022.0 | 5600 | 4.74% | 86404.4 | 357022.0 | 362622.0 | 5600 | 0.67% | 59 | 50.9 |
| 7 | 6 | 373271.3 | 379671.3 | 6400 | 0.75% | 86401.8 | 371143.3 | 377543.3 | 6400 | 0.57% | 24 | 193.3 |
| 8 | 6 | 368471.7 | 374871.7 | 6400 | 2.06% | 86404.4 | 369257.3 | 375657.3 | 6400 | -0.21% | 19 | 214.9 |
| 9 | 6 | 369180.7 | 375580.7 | 6400 | 1.89% | 86405.6 | 369205.0 | 375005.0 | 5800 | -0.01% | 205 | 175.7 |
| Moyenne : | | | | | 2.45% | 86403.2 | | | | 0.77% | 197.7 | 94.9 |

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode approchée de type GRASP-like pour la résolution du Problème d'Ordonnancement des Pipelines Multiproduit de type « One-to-One » (POPM-T1) dans le contexte de l'industrie pétrolière. La méthode approchée comporte de deux composants : une heuristique de construction et une méthode d'amélioration.

L'heuristique de construction permet de créer une solution de façon randomisée. La solution est construite de manière itérative : à chaque itération, on commence par la création d'une liste des candidatures en sélectionnant les produits avec les plus faibles autonomies. Un produit de cette liste est sélectionné par suite pour la création d'un nouveau lot dans la solution. Dans le cas de non-compatibilité du produit sélectionné au lot précédent, une structure d'arbre est utilisée pour faciliter le choix des produits intermédiaires à ajouter pour rendre l'insertion du produit sélectionné réalisable. Un lot est créé pour chaque produit avec un volume maximum et inséré dans la solution. En cas de rupture d'un produit après le déchargement d'un lot, la procédure de réparation est lancée pour retirer les derniers lots et les remplacer par les autres. La réparation s'arrête lors qu'il n'y a plus de rupture après le déchargement des lots planifiés.

La procédure d'amélioration locale a pour objectif d'optimiser le volume des lots en utilisant 3 méthodes d'amélioration. La première (P1) combine entre des opérations de réduction et d'augmentation de volume en vue d'accroître le taux de remplissage du pipeline ; La seconde (P2) rassemble les lots selon le produit qui leur est associé, et utilise des démarches de tri des volumes, par ordre croissant ou décroissant, afin de pouvoir effectuer toute

augmentation de volume possible ; et la troisième (P3) se base sur des opérations de transfert de volume entre chaque paire de lots comportant le même produit, avant de chercher si une augmentation de volume est faisable. Une structure avec l’application de P1 en premier, et l’application de P2 et P3 en boucle est implémentée dans la procédure d’amélioration.

La méthode d’amélioration s’arrête s’il n’y a plus d’amélioration possible ou après un nombre fixé d’itérations. Chaque itération lance successivement les deux méthodes P2 et P3 pour améliorer une solution initiale.

Les expérimentations numériques ont été effectuées en se basant sur les instances présentées dans le chapitre 2. Tout d’abord, une étude de la convergence du GRASP-like permet de montrer que celle-ci fournit la meilleure solution avec une moyenne d’itération inférieure à 200 pour les instances considérées. De plus, une étude de la divergence de l’heuristique de construction prouve que celle-ci permet d’explorer un grand nombre de solutions différentes (avec une moyenne supérieure à 400 sur 500 itérations), notamment pour les instances avec un horizon de planification de 30 jours.

Par ailleurs, la performance de la procédure d’amélioration est évaluée en considérant les instances avec un horizon de 30 jours. Les résultats obtenus sont comparés à ceux fournis par le modèle présenté au chapitre 2, qui considère la séquence des lots comme donnée et optimise uniquement le volume des lots. La procédure d’amélioration permet d’obtenir les volumes optimaux pour les 90 instances étudiées sauf deux, avec un GAP moyen de 0.001% et en un temps rapide (une moyenne de 0.11 secondes contre une moyenne de 9.42 secondes pour le modèle adapté).

En outre, la performance du GRASP-like est évaluée en comparaison avec le modèle linéaire. Les résultats montrent que la méthode approchée permet de fournir des solutions de qualité pour toutes les instances considérées en un temps qui est considérablement réduit par rapport au modèle linéaire. Plus précisément, pour les groupes d’instances avec un horizon de 30 jours et 4 et 6 produits, le GAP moyen obtenu pour les solutions fournies par le GRASP-like est de 0.41% et 0.09% respectivement, avec un temps moyen de calcul de 18.7 secondes et 66.7 secondes respectivement. De plus, concernant certaines instances pour lesquelles le modèle linéaire ne trouve pas de solution optimale sous une limite temporelle de 24 heures, le GRASP-like parvient à fournir de meilleures solutions en un temps de résolution de quelques minute.

Chapitre 4

Proposition d'un programme linéaire pour le Problème d'Ordonnancement des Réseaux de Pipelines « PORP » : cas OCP

Sommaire

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.1 | Introduction..... | 137 |
| 4.2 | Définition du PORP : cas OCP | 138 |
| 4.3 | Etat de l'art du « PORP » | 141 |
| 4.3.1 | Problèmes d'ordonnancement du réseau de pipelines de type MS..... | 141 |
| 4.3.2 | Problèmes d'ordonnancement du réseau de pipelines de type TS | 150 |
| 4.3.3 | Conclusion par rapport aux articles étudiés | 153 |
| 4.4 | Proposition d'un nouveau programme linéaire mixte pour le « PORP-TS » lié au cas OCP | 158 |
| 4.4.1 | Nomenclature..... | 159 |
| 4.4.2 | Contraintes du modèle : | 161 |
| 4.4.3 | Fonction objectif :..... | 179 |
| 4.5 | Expérimentations numériques | 180 |
| 4.5.1 | Présentation de la structure du réseau de pipelines OCP | 180 |
| 4.5.2 | Analyse de la structure du réseau de pipelines OCP..... | 182 |
| 4.5.3 | Présentation d'un exemple d'instance | 197 |
| 4.5.4 | Génération des instances et évaluation de la performance du modèle | 203 |
| 4.5.5 | Analyse de la sensibilité du modèle..... | 210 |
| 4.6 | Conclusion | 216 |

4.1 Introduction

Ce chapitre aborde le problème d'ordonnancement du réseau de pipelines du Groupe OCP. Le Groupe OCP est le premier exportateur de phosphate brut, d'acide phosphorique et d'engrais phosphatés dans le monde. Dans la stratégie d'adaptation d'un nouveau mode de transport moins coûteux, plus fiable et plus durable, le groupe OCP a lancé en 2014 la construction d'un réseau de pipelines de transport de phosphate d'une longueur totale de 235 km qui relie le site minier de Khouribga à la plate-forme de transformation de Jorf Lasfar au Maroc.

Le minerai de phosphate est naturellement humide, et doit être séché avant d'être transporté par voie ferrée. Il est désormais acheminé via le pipeline sous forme de pulpe composée à 60% de minerai et 40% d'eau. Le pipeline offre un mode de transport continu et intégré qui permet

de générer des économies substantielles grâce à l'acheminement du phosphate par voie humide et se traduit également par des économies en eau et en énergie. Par conséquent, l'utilisation du pipeline permettra à OCP de réduire de 90% ses coûts logistiques². Il contribuera également à l'élimination importante des émissions de gaz à effet de serre liées aux activités de séchage, de transport par train et de manutention, à hauteur de 930000 tonnes par an².

Le réseau de pipelines d'OCP peut être modélisé sous forme d'un graphe composé d'une source et de plusieurs destinations qui sont connectés à celle-ci par plusieurs pipelines (voir Figure 4.1). La pulpe de phosphate peut être transportée depuis la source jusqu'aux destinations, selon la demande des clients, locaux ou internationaux, sur un horizon de planification bien précis. Selon leur composition chimique, principalement en termes du composant BPL (Bone Phosphate Lime), les pulpes de phosphate se distinguent par différentes qualités. Chaque qualité de phosphate est considérée comme un produit différent, et possède une demande sur un horizon fixé. Le réseau de pipelines est donc partagé pour le transport de plusieurs produits.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation et à la résolution exacte du Problème d'Ordonnancement du Réseau de Pipelines, noté PORP, du Groupe OCP. L'objectif est de déterminer la séquence et le volume des lots à transporter dans le réseau, pour répondre à une demande des clients sur un horizon fixé, tout en prenant en considération les contraintes relatives à la gestion des stocks et aux caractéristiques des produits. Dans ce cadre, nous définissons tout d'abord le problème d'ordonnancement du réseau des pipelines pour le cas d'OCP dans la section (4.2). Ensuite, nous nous focalisons sur l'état de l'art du PORP dans la section (4.3). Nous détaillons la formulation mathématique proposée dans la section (4.4). Enfin, les expérimentations numériques réalisées pour tester la performance du modèle proposé sont présentées dans la section (4.5).

4.2 Définition du PORP : cas OCP

Le réseau de pipelines d'OCP se compose d'un pipeline principal et de plusieurs pipelines secondaires pour transporter les produits de phosphate depuis une source (nommée Station de Tête) à des destinations (clients locaux ou internationaux) en passant par la « Station Terminale » (voir Figure 4.1). La première destination concerne les clients locaux de la plateforme de transformation de Jorf Lasfar. La seconde destination porte sur l'unité du Downstream, où les produits de phosphate arrivés sont séchés avant d'être livrés aux clients internationaux.

² <http://www.ocp-siam.com/sites/default/files/plaquette-slurry-pipeline.pdf>

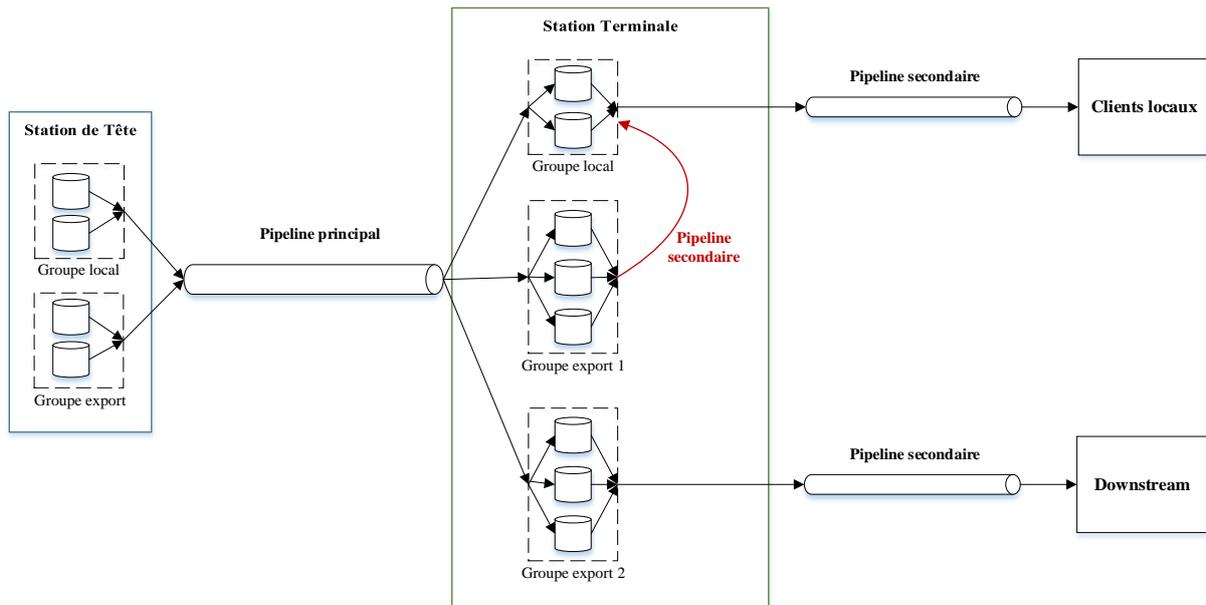


Figure 4.1 : Schéma du réseau de pipelines OCP

Les produits transportés par le réseau de pipelines sont sous forme de pulpe, c'est-à-dire un mélange de phosphate avec de l'eau. La pulpe de phosphate est considérée comme un produit homogène. Les produits sont dénommés qualités de phosphate, et se différencient les uns des autres par leur composition chimique, principalement en termes du composant BPL (Bone Phosphate Lime). Au total, on distingue 8 produits : le produit local K09L destiné aux clients locaux et les produits d'export, qui sont au nombre de 7 (K01, K02, K08, K09DS, K10, K12, K20). Parmi les 7 produits d'export, les 3 premiers (K01, K02 et K08) sont de basse qualité et les 4 derniers (K09DS, K10, K12 et K20) de haute qualité (i.e. possèdent une composition en BPL plus élevée).

Ces produits sont transportés dans le pipeline principal puis déchargés dans des différents bacs de stockage organisés en groupes à la « Station Terminale ». Cette dernière dispose de 3 groupes de stockage : le « groupe local » (GL), le « groupe export 1 » (GE1) et ; le « groupe export 2 » (GE2). Le nombre de bacs de chaque groupe est illustré sur Figure 4.1.

Les groupes GL et GE1 sont réservés au produit local. Parmi les deux groupes, le GE1 est initialement conçu pour les produits d'export, mais il est utilisé actuellement pour le stockage du produit local en raison de la forte demande de ce dernier. Un pipeline secondaire entre le GL et le GE1 est activé pour assurer le transfert du produit K09L du GE1 au GL.

Le GE2 est partagé entre les différents produits d'export. Un bac de stockage du GE2 ne peut contenir qu'un seul produit à la fois. Une opération de rinçage sera effectuée dans un bac si ce dernier est utilisé pour stocker un produit de haute qualité, sachant qu'il contenait auparavant un produit de basse qualité ; sinon, pas de rinçage. Cette opération consiste à

consommer un volume du produit de haute qualité au début de déchargement pour rincer le bac afin d'éviter toute contamination.

Le transport est réalisé en injectant une séquence de lots à la station de tête. Chaque lot comporte un seul produit et possède un volume compris entre les bornes minimale et maximale. En vue d'éviter la contamination des produits et d'identifier chaque lot durant l'opération de déchargement aux destinations, un volume d'eau est inséré entre chaque deux lots successifs.

A partir des demandes des clients locaux et de celles reçues par le Downstream de la part des clients internationaux, sur un horizon de planification fixé, l'objectif est de fournir un ordonnancement des lots pour répondre à ces demandes, en maximisant le volume total transporté. Pour cela, les paramètres d'entrée suivants sont supposés connus :

- La longueur de l'horizon de planification (en jour) ;
- Le nombre de produits ;
- Le débit du pipeline principal et des pipelines secondaires ;
- Le nombre de groupes/bacs de stockage ;
- La capacité de stockage de chaque groupe/bac ;
- Le stock initial pour chaque groupe/bac ;
- Le volume minimum/maximum des lots selon les produits ;
- La demande des clients locaux et des clients internationaux (downstream) sur l'horizon de planification ;
- La matrice de compatibilité des produits ;
- La matrice de rinçage.

Les hypothèses suivantes sont considérées :

- La pulpe de phosphate se comporte comme un fluide homogène ;
- Le débit des pipelines est constant et l'écoulement de la pulpe est toujours turbulent sans sédimentation des granulats ;
- Les bacs d'un groupe de stockage peuvent être remplis simultanément (GL et GE1) ou successivement (GE2) ;
- Le remplissage et la vidange d'un groupe de stockage peuvent s'effectuer de manière simultanée. Il s'agit donc d'un réapprovisionnement en continu ;
- Le groupe GE1 est dédié au produit K09L ;
- La distribution des demandes suit une loi uniforme sur l'horizon de planification.

L'ordonnancement obtenu en sortie doit fournir les éléments suivants :

- Les lots à envoyer par pipeline durant l'horizon de planification, ainsi que le type de produit à transporter et le volume pour chaque lot ;
- Les dates de début et fin de déchargement des lots ;

- Les dates de déchargement des blocs des lots, avec le groupe de stockage destiné pour chaque bloc ;
- Le niveau de stock des groupes/bacs après le déchargement des lots.

4.3 Etat de l'art du « PORP »

Le réseau de pipeline est considéré comme un moyen sûr et important pour le transport des produits liquides sur de longues distances, notamment dans le domaine pétrolier (Rejowski et Pinto, 2003). De nombreux travaux de recherche ont été menés, depuis des deux dernières décennies, sur les problèmes d'ordonnement de pipelines. Parmi lesquels, (Magatão *et al.*, 2015) ont proposé une classification des problèmes d'ordonnement de pipelines selon la structure du pipeline : pipeline linéaire et réseau de pipelines. De plus, la classe du réseau de pipelines est divisée en deux catégories comme suit :

- Réseau de pipelines de type « mesh-structure » (MS) : le réseau comporte plusieurs sources reliées à des destinations au moyen de plusieurs pipelines ;
- Réseau de pipelines de type « tree-structure » (TS) : le réseau comporte une seule source liée à plusieurs destinations par plusieurs pipelines.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons plus particulièrement aux problèmes d'ordonnement du réseau de pipelines. De ce fait, les travaux étudiés sont présentés selon le type du réseau de pipelines : la sous-section 4.3.1 s'intéresse à la présentation des travaux sur les problèmes d'ordonnement du réseau de pipelines de type MS (PORP-MS) ; la sous-section 4.3.2 se focalise sur les travaux traitant les problèmes d'ordonnement du réseau de pipelines de type TS (PORP-TS) ; avant la conclusion par rapport aux travaux étudiés dans la sous-section 2.3.4.

4.3.1 Problèmes d'ordonnement du réseau de pipelines de type MS

Le travail de (De la Cruz *et al.*, 2003) est parmi les premiers travaux sur un problème d'ordonnement du réseaux de pipelines. Les auteurs considèrent un système de type « mesh-structure » qui se compose de 3 sources, 4 destinations et 5 nœuds intermédiaires. Ceux-ci sont reliés entre eux par un total de 20 pipelines unidirectionnels et un pipeline bidirectionnel. La formulation du problème se base sur une représentation discrète du temps et du volume de lots, ces derniers étant considérés comme des paquets. La fonction objectif possède deux critères d'optimisation : la minimisation du temps de satisfaction des demandes et la minimisation du volume contaminé entre les lots successifs. Ce dernier critère est assuré en minimisant le nombre de changements des produits au niveau des pipelines. Il prend en compte les contraintes suivantes : la première concerne le respect d'un nombre minimum de lots à produire au niveau de chaque source ; la seconde est liée à la satisfaction de la demande au niveau des destinations ; la troisième contrainte porte sur l'interdiction de collision entre les lots dans le pipeline bidirectionnel. Un algorithme génétique est proposé pour la résolution de ce problème.

L'instance utilisée pour évaluer la performance de l'algorithme possède un horizon de 80 périodes de temps. L'algorithme est capable de fournir une solution qui satisfait les contraintes au bout de 10 générations sur un nombre total fixé à 12000. Cependant, l'ordonnancement détaillé, précisant le volume des lots et leurs dates de chargement/déchargement, n'est pas fourni dans l'article, d'autant plus qu'il n'y a pas d'information sur le temps de calcul.

Par la suite, (De la Cruz et *al.*, 2005) présentent un travail étendu sur le PORP-MS de (De la Cruz et *al.*, 2003). Les auteurs proposent une méthode hybride qui combine l'algorithme génétique et le modèle linéaire mixte « *Mixed Integer Linear Program* » (MILP) : le modèle linéaire et l'algorithme sont exécutés de manière alternative et les résultats obtenus par le modèle sont pris en compte par l'algorithme pour fournir une solution. La performance de la méthode hybride est comparée à celle du modèle linéaire et de l'algorithme génétique, en se basant sur une instance comportant 2 sources, 3 destinations et 2 nœuds intermédiaires. Ces derniers sont reliés par 7 pipelines, dont un est bidirectionnel. Les résultats obtenus montrent que, pour un nombre d'itérations fixé à 5000, la méthode hybride fournit une solution qui comporte le plus faible nombre de changements de produits, par rapport au modèle et à l'algorithme génétique. En revanche, aucune information n'est présentée en relation avec le temps de calcul.

(Mori et *al.*, 2007) proposent un modèle de simulation à événements discrets pour étudier un PORP-MS. Chaque événement représente une opération de chargement d'un lot. Le modèle de simulation comprend un modèle d'optimisation qui fournit, en premier lieu, un ordonnancement des lots. Par la suite, le modèle de simulation vérifie la faisabilité de l'ordonnancement en simulant les opérations de chargement des lots pour obtenir l'évolution des stocks durant l'horizon de planification fixé. Une instance est considérée pour mesurer la performance du modèle de simulation, qui comprend 3 sources, 5 destinations, et un port qui peut recevoir ou envoyer des produits pétroliers. Les composants du système étudié sont reliés par 15 pipelines qui peuvent transporter 8 produits. Le résultat fourni tout d'abord par le modèle d'optimisation comporte 81 lots à transporter sur un horizon de 20 jours. Cette solution est simulée par la suite pour obtenir des informations sur l'évolution du niveau des stocks et sur le taux d'utilisation des pipelines. Le temps de calcul nécessaire pour effectuer la simulation pour cette instance est de 3 minutes. Cependant, aucune information n'est fournie par rapport au modèle d'optimisation.

(Neves Jr et *al.*, 2007) se focalisent sur un PORP-MS et proposent une méthode hybride qui se compose d'une heuristique et d'un modèle linéaire mixte (MILP). L'heuristique est exécutée en premier, et permet de fournir un séquençement des lots, chacun de ceux-ci possède un point de départ et de destination, et une fenêtre de temps durant laquelle il peut être livré. Par la suite, le modèle linéaire prend en compte le séquençement obtenu par l'heuristique, et en se basant sur une formulation temporelle continue, fournit en sortie un ordonnancement des lots, en spécifiant la date de chargement et de déchargement de chaque lot. La fonction objectif

du modèle linéaire comprend trois critères d'optimisation : la minimisation du temps d'arrêt des pipelines, la minimisation des demandes satisfaites en dehors des fenêtres de temps leur correspondant, et la minimisation du coût de variation de l'électricité durant les heures de pointe. Le dernier critère est minimisé en évitant de charger les lots pendant les heures de pointe. En vue d'évaluer la performance de la méthode hybride, l'instance de (Mori et *al.*, 2007) est considérée, avec un horizon de planification de 30 jours. La méthode permet de fournir une solution en quelques secondes. La solution obtenue est représentée sous forme d'un diagramme de Gantt qui illustre l'ordonnement des lots, sur l'horizon fixé, pour chaque pipeline, ainsi que le taux d'utilisation de ces derniers.

(Moura et *al.*, 2008) présentent une méthode hybride pour étudier un PORP-MS. La méthode proposée se compose de d'une heuristique et d'un modèle de programmation par contraintes « Constraint Programming » (CP). L'heuristique est exécutée en premier pour obtenir un ensemble de séquences des lots permettant de satisfaire la demande, en spécifiant le volume de chaque lot, son produit et ses points d'origine et de destination. Par la suite, le modèle CP permet d'ordonner les lots en déterminant exactement leurs dates de chargement et de déchargement, de façon à satisfaire toutes les demandes sur l'horizon de planification. La stratégie de recherche d'une solution consiste à ordonner en premier les lots au niveau des pipelines où les séquences comportent un nombre important de lots, avant de passer aux autres pipelines. La performance de la méthode hybride est mesurée en se basant sur deux instances prises d'un cas réel qui comporte 14 nœuds pouvant recevoir ou envoyer des produits, et qui sont liés entre eux à l'aide de 29 pipelines. La première instance possède un horizon de 7 jours, et la seconde un horizon de 10 jours. Les résultats obtenus montrent que la méthode hybride permet de fournir des solutions avec un temps de calcul d'environ 5 minutes pour les deux instances.

(Cafaro and Cerdá, 2009) s'intéressent à un PORP-MS et présentent un modèle linéaire mixte (MILP) pour l'étudier. Le modèle linéaire repose sur une formulation continue du temps et du volume. Sa fonction objectif comporte quatre critères d'optimisation : la minimisation du volume total contaminé entre les lots planifiés, la minimisation des temps d'arrêts des pipelines, la minimisation du coût de pompage et la minimisation des demandes livrées avec retard. Le modèle considère que les opérations de chargement des lots sont réalisées une à la fois : durant une période, une seule source peut charger un lot dans un pipeline. La performance du modèle linéaire est mesurée en se basant sur un système qui possède deux sources et trois destinations. Deux configurations ont été adoptées : dans la configuration 1, la production de certains produits est spécifique chaque source ; dans la configuration 2, les deux sources peuvent fabriquer tous les produits. Pour chaque configuration, trois scénarios sont considérés, en variant la longueur de l'horizon de planification : 5, 7 et 10 jours. Les résultats obtenus montrent, qu'en fixant le nombre d'opérations de chargement désiré, le modèle permet de fournir la solution optimale pour les scénarios considérés en quelques minutes. De plus, le

temps de calcul pour les scénarios de la configuration 1 est légèrement plus faible en comparaison avec celui des scénarios de la configuration 2. Néanmoins, la fonction objectif de chaque solution de la configuration 2 possède un coût de pompage plus faible que celle de la configuration 1.

(Boschetto et *al.*, 2010) proposent une méthode hybride basée sur celle de (Neves Jr et *al.*, 2007) pour traiter un PORP-MS. La méthode hybride se compose de ce qui suit : 4 étapes qui sont réalisées par un ensemble d'heuristiques ; et un modèle linéaire mixte (MILP) qui joue le même rôle que celui de (Neves Jr et *al.*, 2007) dans la méthode hybride. La première étape consiste à créer, à l'aide d'une première heuristique, des séquences initiales des lots en se basant sur les données relatives à la production et à la demande. Puis, les séquences créées sont considérées dans la seconde étape par un algorithme génétique. Celui-ci permet de générer une ou plusieurs séquences alternatives. Par la suite, dans la troisième étape, une deuxième heuristique regroupe les résultats obtenus par les deux premières étapes et évalue les dates de chargement et de déchargement des lots. Cette heuristique permet également de diviser le volume des lots en plusieurs parties, en vue d'anticiper le cas où il est nécessaire d'arrêter l'opération de chargement pendant les heures de pointe, à cause de l'augmentation du coût de l'électricité. Enfin, la dernière étape consiste à préciser, en utilisant le modèle linéaire, les dates exactes de chargement et déchargement des lots, ainsi que l'évolution des stocks durant l'horizon de planification. La fonction objectif comprend deux critères d'optimisation, à savoir la minimisation du temps de satisfaction des demandes et la minimisation des demandes satisfaites en dehors des fenêtres de temps qui leur sont associées. En vue d'évaluer la performance de la méthode hybride proposée, une instance avec un horizon de 30 jours est considérée, et comprend 4 sources, 2 ports et 8 destinations liés entre eux par 30 pipelines bidirectionnels. Les heuristiques donnent 3 ensembles de séquences qui sont utilisés à l'entrée du modèle linéaire. Ce dernier permet d'obtenir des solutions avec un temps de calcul moyen de 3 minutes. Cependant, il est constaté que certains lots planifiés ne respectent pas la fenêtre de temps qui leur correspond, vu que le modèle ne permet pas d'effectuer des opérations de chargement en parallèle au niveau des sources. Ceci engendre une livraison des produits avec retard. De plus, la même instance est utilisée pour comparer le modèle linéaire proposé avec celui de (Neves Jr et *al.*, 2007), nommé modèle simplifié. En revanche, la comparaison est effectuée uniquement par rapport à la taille du modèle et au temps de calcul, puisque les deux modèles ne possèdent pas la même fonction objectif.

(Cafaro and Cerdá, 2010) proposent un modèle linéaire mixte (MILP) qui prend en considération les opérations de chargement en parallèle pour les différentes sources. Le modèle utilise une formulation continue du temps et du volume des lots. La fonction objectif comprend deux alternatives : la première possède un critère d'optimisation qui correspond à la minimisation du temps de satisfaction des demandes (makespan). Cette option est utilisée si l'horizon de planification et les dates de livraison ne sont pas connues. Dans le cas contraire, la

seconde alternative est considérée : elle se compose de trois critères d'optimisation : la minimisation du coût relatif au volume contaminé entre deux lots successif, la minimisation du coût de pompage et la minimisation du coût lié aux demandes livrées avec retard. Le choix de la fonction objectif du modèle linéaire dépend donc de données d'entrée. Le modèle est évalué en considérant trois instances différentes avec un horizon de planification de 10 jours. Le modèle est comparé avec celui de (Cafaro and Cerdá, 2009) qui ne considère pas les opérations de chargement en parallèle, nommé modèle séquentiel, en vue d'analyser l'impact de cette option. Les résultats montrent que le modèle proposé fournit un ordonnancement avec un makespan plus faible que le modèle séquentiel, mais requiert plus de temps de calcul. D'autre part, le temps de résolution du modèle proposé s'accroît de façon linéaire lorsque le nombre d'opérations de chargement augmente, contrairement au modèle séquentiel, dont le temps de calcul augmente de manière exponentielle.

(Herrán et al., 2010) présentent un modèle linéaire mixte (MILP) pour un PORP-MS. Le réseau de pipeline pris en compte est celui étudié par (De la Cruz et al., 2005) : le système comprend 2 sources, 3 destinations et 2 nœuds intermédiaires. Ils sont liés par 7 pipelines, dont un est bidirectionnel. Le modèle linéaire proposé est basé sur une formulation discrète du temps et du volume de lot. En effet, l'horizon de planification est discrétisé en plusieurs périodes de même longueur (en heures), et les pipelines sont divisés en plusieurs parties ayant le même volume (en m^3), où chacune peut contenir un seul produit. La fonction objectif du modèle se compose de quatre coûts à minimiser, à savoir : le coût de pompage, le coût lié au temps d'arrêt des pipelines, le coût relatif au volume contaminé entre les lots successifs et le coût de possession du stock. Les auteurs proposent également une version simplifiée du modèle qui force l'envoi des lots dans les pipelines à chaque période de temps, sauf dans le cas des pipelines bidirectionnels. Cette version ne peut être utilisée que dans le cas où la production et la demande sont élevées, avec un coût de pompage faible. En vue d'évaluer la performance du modèle complet et du modèle simplifié, trois scénarios d'une instance avec un horizon de 100 heures sont considérés. Les résultats obtenus montrent que, lorsque la demande ou le coût d'arrêt des pipelines sont élevés (scénarios 2 et 3), le modèle simplifié permet de fournir la même solution que le modèle complet, avec un temps de calcul réduit (de l'ordre de 15 minutes pour le modèle simplifié contre 3 heures environ pour le modèle complet). Cependant, pour le scénario 1, le modèle simplifié fournit une solution avec un coût total plus grand que le modèle complet avec un écart de 20%, et nécessite un temps de calcul de 40 minutes, contre plus de 5 heures pour le modèle complet.

(Arruda et al., 2010) proposent une méthode hybride pour étudier un PORP-MS. La méthode hybride est composée d'un algorithme génétique multi-objectifs « *Multiobjective Genetic Algorithm* » (MOGA) et du modèle linéaire présenté par (Boschetto et al., 2010). Le MOGA se base sur un ensemble de données d'entrée fournies par l'opérateur : le nombre de lots à planifier sur l'horizon temporel ; pour chaque lot, les informations suivantes doivent être

connues : la source, la destination, le chemin de transport qui peut comporter un ou plusieurs pipelines, les dates de chargement au plutôt et au plus tard, et les dates de déchargement au plutôt et au plus tard. A partir de ces données, le MOGA permet de fournir une ou plusieurs séquences des lots en se basant sur quatre critères à minimiser : le temps de satisfaction des demandes, le nombre d'interfaces entre les lots, le nombre de lots chargés en dehors des fenêtres de temps correspondantes, et le nombre de lots déchargés en dehors de des fenêtres de temps respectives. Le concept de l'optimalité de Pareto est utilisé pour trouver des solutions : parmi un ensemble de solutions obtenues, la ou les solutions retenues sont celles qui possèdent un critère minimisé sans pour autant causer une augmentation d'au moins un autre critère. Ces solutions sont appelées solutions non-dominées. Le MOGA est testé en se basant sur une instance avec un horizon de 30 jours. Le MOGA est exécuté en utilisant 2 populations différentes. Pour chaque exécution, les 4 meilleures solutions non-dominées sont retenues. Le MOGA est de ce fait considéré comme un outil d'aide à la décision, puisqu'il permet à l'opérateur de choisir les séquences de lots selon le critère qu'il souhaite minimiser en priorité. Néanmoins, aucune information sur le temps de calcul n'est fournie.

(Lopes et *al.*, 2010) introduisent une méthode hybride qui se compose d'une heuristique et d'un modèle de programmation par contrainte (CP) pour traiter un PORP-MS. En effet, l'heuristique permet, dans un premier temps, de générer un ensemble de lots, et de fournir pour chaque lot les éléments suivant : la source, la destination, le cheminement (c'est-à-dire le ou les pipelines qui le concernent), le produit, le volume ainsi que la date de livraison. Dans un second temps, le modèle (CP) est composé à son tour de deux étapes : la première étape se base sur l'ensemble des lots fournis par l'heuristique pour déterminer tout d'abord leur séquençement, en commençant par les lots ayant les premières dates de livraison. Par la suite, la seconde étape fournit les dates de départ et d'arrivée des lots à partir du séquençement établi par la première étape. La performance de la méthode hybride est mesurée en considérant quatre instances (une avec un horizon de 10 jours et trois avec un horizon de 7 jours). Toutes instances concernent le même réseau de pipelines comportant 14 dépôts reliés par 30 pipelines. La méthode hybride permet de fournir des solutions pour les instances considérées, avec un temps de calcul moyen de 10 minutes.

(Cafaro and Cerdá, 2012) proposent un modèle linéaire mixte MILP pour étudier un PORP-MS. Le système considéré se compose de 2 sources et 9 destinations reliées entre elles par 7 pipelines unidirectionnels. Dans lequel, plusieurs opérations de chargement des lots peuvent être effectuées en même temps. De plus, les opérations de chargement réalisées en parallèle durant une période sont regroupées en une opération appelée « exécution mixte » (composite run). La fonction objectif du modèle linéaire est composée de cinq critères d'optimisation à minimiser : le coût de pompage, le coût lié à la demande satisfaite avec retard, le coût relatif au volume contaminé entre les lots successifs, le coût de possession du stock et le coût lié au temps de satisfaction des demandes. En vue de tester le modèle proposé, trois instances sont

considérées avec un horizon de planification de 10 jours. Les résultats obtenus montrent qu'en augmentant le nombre d'opérations de chargement en parallèle, le modèle nécessite davantage de temps pour fournir une solution : le temps de calcul augmente de quelques minutes à quelques heures.

(Magatão *et al.*, 2012) développent une méthode hybride basée sur celle de (Boschetto *et al.*, 2010) pour aborder un PORP-MS. La méthode hybride proposée se compose de trois étapes principales : la première étape consiste à planifier le volume total nécessaire pour satisfaire la demande sur l'horizon de planification, ainsi que les pipelines considérés pour transporter les produits. Cette étape utilise un modèle linéaire mixte MILP en minimisant des critères d'optimisation suivants : le volume des produits à envoyer, les ruptures de stock et le dépassement de la capacité de stockage, les stocks intermédiaires, le nombre de pipelines ayant un flux bidirectionnel, et le temps d'arrêt des pipelines. Une fois l'étape de planification réalisée, les résultats sont repris par un second modèle linéaire mixte MILP qui effectue le séquençement des lots en divisant le volume total planifié en plusieurs lots. La fonction objectif du second modèle comporte quatre critères d'optimisation : minimiser la différence entre le volume total planifié par le premier modèle et le volume total déterminé par le second modèle, minimiser la pénalité relative au non-respect de la capacité de stockage (dépassement ou rupture), minimiser le nombre total des lots générés et maximiser le stock ayant le niveau le plus bas au niveau des destinations. Par la suite, la dernière étape consiste à déterminer l'ordonnement des lots en calculant leurs dates de chargement et de déchargement. Cette partie est similaire à celle considérée dans (Boschetto *et al.*, 2010). En vue de tester la performance des deux modèles proposés, 8 scénarios d'une instance avec un horizon de 30 jours ont été pris en compte. L'instance est basée sur un cas réel, où le système considéré se compose de 4 sources, 9 destinations et un nœud intermédiaire, ces derniers étant tous reliés par 30 pipelines bidirectionnels. Le premier modèle permet de fournir, en quelques secondes, la planification des produits pour les scénarios considérés sur un mois. Par la suite, le volume total planifié, pour chaque scénario, est divisé en quatre parties égales, pour indiquer un planning hebdomadaire. Ce dernier est pris en compte par le second modèle linéaire pour déterminer la séquence des lots. Le temps de calcul est limité dans ce cas à 30 minutes. Les résultats obtenus montrent que le second modèle ne parvient pas à fournir des solutions optimales et dépasse le temps de calcul fixé pour tous les scénarios, avec un GAP supérieur à 88% dans 6 scénarios sur 8.

(De Souza Filho *et al.*, 2013) proposent une méthode hybride pour un PORP-MS. Cette méthode hybride se compose d'un modèle linéaire mixte (MILP) et d'une heuristique. Le modèle linéaire est basé sur une formulation discrète du temps et du volume des lots. Sa fonction objectif comporte deux critères d'optimisation : la minimisation du coût de pompage et la minimisation du coût lié au volume contaminé entre les lots consécutifs. Le modèle est utilisé dans un premier temps pour créer un ordonnancement des lots. Par la suite, l'heuristique est

appliquée pour regrouper certains lots ayant le même produit, dans le but de réduire le nombre de surface de contact entre les lots. Ensuite, la solution de l'heuristique est prise en compte en entrée du modèle linéaire pour vérifier sa faisabilité. L'exécution de l'heuristique et l'évaluation par le modèle sont réitérées pendant une durée déterminée. La méthode hybride proposée est testée en considérant trois instances basées sur un cas réel, avec un horizon de planification de 7 jours. Le système considéré se compose de 4 sources et 4 destinations reliées entre elles par 8 pipelines. La performance de la méthode hybride est comparée à celle du modèle linéaire de (Pereira, 2008), en utilisant ces instances. Le temps d'exécution de l'heuristique est limité à 30 minutes, et celui du modèle linéaire à 3 heures et 30 minutes. Les résultats obtenus indiquent que le modèle linéaire proposé permet de trouver des solutions réalisables pour les trois instances, contrairement au modèle de (Pereira, 2008). Cependant, il ne parvient pas à fournir la solution optimale dans les limites fixées du temps de calcul, avec un GAP supérieur à 72% pour les trois instances. De plus, l'heuristique proposée permet d'améliorer la meilleure solution de la dernière instance de 25% ; mais aucune amélioration n'est effectuée sur les meilleures solutions obtenues pour les deux premières instances.

(Ribas et al., 2013) proposent une méthode hybride basée sur un algorithme micro-génétique « *Micro Genetic Algorithm* » (mGA) et un modèle linéaire mixte MILP, en vue de traiter un PORP-MS. L'algorithme mGA permet de fournir une ou plusieurs séquences des lots. Par la suite, le modèle linéaire présenté par (Boschetto et al., 2010) est adopté pour déterminer les dates de chargement et déchargement des lots, tout en minimisant une fonction objectif composée de trois critères d'optimisation : le temps de satisfaction des demandes, le volume contaminé entre les lots successifs et le coût lié à la livraison des lots en dehors des fenêtres de temps. La performance de l'algorithme mGA est comparée à celle de l'algorithme génétique de (Arruda et al., 2010), en utilisant 4 scénarios de l'instance présentée par (Boschetto et al., 2010), avec un horizon de planification de 30 jours. Les résultats fournis montrent que l'algorithme mGA proposé donne des solutions en un temps de calcul inférieur à celui de l'algorithme génétique de (Arruda et al., 2010) pour les 4 scénarios : une moyenne de 4 heures et 40 minutes contre une moyenne d'un jour et 19 heures.

(Magatão et al., 2015) reprennent la structure de la méthode hybride proposée par (Boschetto et al., 2010) et (Magatão et al., 2012). La méthode hybride proposée se compose d'un ensemble d'heuristicques qui visent à fournir un séquençement des lots pour chaque pipeline du système considéré. Par la suite, un modèle linéaire mixte (MILP) prend en compte les séquences obtenues pour déterminer les dates exactes de chargement et de déchargement des lots. La nouveauté que présentent (Magatão et al., 2015) réside dans la dernière étape de la méthode hybride, où un modèle linéaire mixte (MILP) divisé en deux phases est proposé. Cette décomposition est réalisée dans le but de réduire le temps de calcul. La fonction objectif du modèle linéaire minimise les trois critères d'optimisation suivants : le temps de satisfaction des demandes, les ruptures de stock et la pénalité relative au non-respect de la capacité de stockage.

En vue de mesurer la performance du modèle décomposé, ce dernier est comparé à celui de (Boschetto et *al.*, 2010), en utilisant les 8 scénarios de l'instance présentée dans (Magatão et *al.*, 2012), avec un horizon de 30 jours. Le temps de résolution est limité à 5 heures. Les résultats fournis montrent que le modèle décomposé donne des solutions avec un temps de calcul plus faible que le modèle en un bloc : le modèle décomposé fournit les solutions en quelques minutes, alors que le modèle de (Boschetto et *al.*, 2010) ne parvient pas à trouver de solution optimale pour les deux derniers scénarios sous la limitation temporelle de 5 heures.

(Liao et *al.*, 2018b) proposent un modèle non-linéaire mixte « *Mixed Integer Non Linear Program* » (MINLP) pour aborder un PORP-MS. Le modèle se base sur une représentation temporelle discrète et sur une représentation continue du volume des lots. De plus, il prend en compte la pression des pompes au niveau des différents nœuds du réseau de pipelines. La non-linéarité du modèle relève de la contrainte qui représente la relation entre le débit de pompage et la pression. En outre, la fonction objectif minimise les trois critères d'optimisation suivants : le coût lié au volume contaminé entre les lots consécutifs, le coût de la variation de l'électricité pendant les heures de pointe et le coût relatif au redémarrage des pompes. Par ailleurs, un algorithme est utilisé comme pré-traitement pour réduire le temps de résolution du modèle. Il permet de choisir les lots à injecter dans le réseau de pipeline selon trois critères : le premier critère repose sur la continuité, c'est-à-dire qu'il faut charger un lot avec le volume maximum possible afin d'éviter les arrêts et redémarrages des pompes ; le second critère concerne le respect de la contrainte de compatibilité des produits lors du chargement d'un nouveau lot ; le dernier critère consiste à charger en premier les produits dont les stocks au niveau des sources sont proches de la borne supérieure. En vue d'évaluer la performance du modèle, trois instances sont utilisées avec un horizon de planification de 100 heures et en considérant un pas de 10 minutes. Le temps de résolution est limité à 3 heures. Les résultats obtenus indiquent que le modèle proposé donne des solutions pour les trois instances en quelques minutes.

Récemment, (Taherkhani et *al.*, 2020) présentent un modèle linéaire mixte inspiré de celui de (Mostafaei et *al.*, 2015) pour le PORP-MS. Le système considéré se compose de 2 sources, dont une peut recevoir et envoyer les lots, et 7 destinations, toutes liées par 5 pipelines. Le modèle proposé utilise une formulation continue du temps et du volume des lots. De plus, l'horizon de planification est décomposé en plusieurs périodes, et les demandes sont à satisfaire à la fin de chaque période. Durant chaque opération de chargement, un ou plusieurs lots peuvent être envoyés dans les pipelines. Trois critères d'optimisation sont considérés dans la fonction objectif, à savoir : la minimisation du volume contaminé entre deux lots successifs, la minimisation des demandes livrées avec retard et la minimisation des coûts de pompage. En vue de tester la performance du modèle, deux instances sont considérées avec 4 produits : la première possède un horizon de 10 jours et la seconde un horizon de 8 jours. Ces deux horizons sont divisés sur deux périodes, et la demande des clients doit être satisfaite sur chaque période. Les auteurs varient le nombre d'opérations de chargement pour trouver le minimum des coûts

de la fonction objectif : avec un nombre d'opérations de chargement faible, le modèle fournit la solution optimale en un temps rapide (en quelques secondes). Toutefois, certaines demandes risquent d'être livrées avec retard. Avec un nombre d'opérations de chargement élevé, le modèle nécessite plus de temps de calcul, mais avec plus de chance de trouver une solution où toutes les demandes seront satisfaites. En outre, deux instances sont prises en compte, avec un horizon de 4 jours pour la première et de 10 jours pour la seconde, afin de pouvoir comparer les résultats du modèle avec ceux des travaux précédents, notamment (Cafaro and Cerdá, 2010) et (Cafaro and Cerdá, 2012). Cependant, la comparaison ne concerne que la taille du modèle (variables et contraintes) et le temps de calcul. Elle ne peut pas être réalisée par rapport à la fonction objectif, vu que les modèles proposés ne possèdent pas les mêmes critères d'optimisation.

4.3.2 Problèmes d'ordonnancement du réseau de pipelines de type TS

(Garcia-Sanchez et al., 2008) développent une méthode hybride pour étudier un PORP-TS. Le système considéré est un réseau de pipelines qui comprend une source, 4 destinations et un nœud intermédiaire, ces derniers étant connectés par 5 pipelines unidirectionnels. La méthode hybride proposée combine un modèle de simulation avec une recherche tabou. En effet, le modèle de simulation permet d'évaluer un ordonnancement initial introduit par l'opérationnel. La fonction objectif est composée de plusieurs critères d'optimisation, à savoir : la minimisation du temps d'arrêt des pipelines, la minimisation des ruptures de stock, la minimisation des demandes livrées avec retard et la minimisation du volume contaminé entre deux lots successifs. Les informations fournies par le modèle de simulation sont utilisées à l'entrée de la recherche tabou en vue d'améliorer la solution initiale. La recherche tabou comprend un ensemble d'étapes, chacune d'entre elles explore un nombre maximum de voisinages fixé en effectuant une ou plusieurs opérations (insertion d'un lot, transfert de volume entre deux lots de même produit, regroupement de deux lots ou fractionnement d'un lot en deux), pour pouvoir améliorer un des critères d'optimisation de la fonction objectif, sans dégrader la valeur des autres critères. La solution obtenue par la recherche tabou est évaluée de nouveau par le modèle de simulation. Plusieurs itérations peuvent être effectuées entre les deux méthodes. La performance de la méthode hybride est évaluée en se basant sur une instance avec un horizon de planification d'un mois. La recherche tabou est exécutée 20 fois, en fixant le temps de calcul à 5 heures pour chaque exécution. Les résultats obtenus montrent qu'une première solution peut être obtenue au bout d'une heure.

(MirHassani and Jahromi, 2011) proposent un modèle linéaire mixte MILP pour traiter un PORP-TS. Le modèle linéaire se base sur une représentation continue du temps et du volume des lots. Le modèle linéaire prend en compte plusieurs critères d'optimisation dans sa fonction objectif, à savoir : minimiser coût de possession du stock, minimiser le coût de pompage, minimiser le coût relatif au volume contaminé entre les lots successifs et minimiser la variation du coût de l'électricité pendant les heures de pointe. Par ailleurs, le modèle suppose qu'au plus

un seul lot peut être transféré d'un pipeline à un autre durant le chargement d'un nouveau lot. Le modèle est testé en utilisant trois instances : la première instance comporte un horizon de planification de 90 heures, la seconde un horizon de 72 heures, et la dernière un horizon de 30 jours. Les résultats fournis pour les instances 1 et 3 prouvent que le modèle permet de fournir une solution en un temps de calcul raisonnable : moins d'une minute pour l'instance 1 et 4 minutes environ pour l'instance 3. De plus, en utilisant l'instance 2, le modèle proposé est comparé à celui de (MirHassani and Ghorbanalizadeh, 2008) qui se base une formulation discrète du temps et du volume. Sa fonction objectif comporte un seul critère d'optimisation, qui est la minimisation du coût relatif au volume contaminé entre les lots successifs. Le résultat obtenu montre que le modèle continu de (MirHassani and Jahromi, 2011) fournit une solution en un temps de calcul réduit (moins d'une minute contre une heure pour le modèle discret de (MirHassani and Ghorbanalizadeh, 2008)). En revanche, la comparaison entre les deux modèles se limite uniquement au temps de calcul et à la taille du modèle (nombre de contraintes et de variables) ; aucune information n'est fournie sur la qualité de solution. De plus, les solutions détaillées ne sont pas présentées dans l'article.

(Cafaro and Cerdá, 2011) s'intéressent à un PORP-TS et présentent un modèle linéaire mixte MILP. Le modèle proposé utilise une formulation continue du temps et du volume des lots. Il permet d'envoyer plusieurs lots en parallèle d'un pipeline à un autre durant l'opération de chargement d'un lot. La fonction objectif considérée comporte cinq critères à minimiser : le coût de pompage, le coût lié au volume contaminé entre les lots consécutifs, le nombre de commandes avec retard de livraison, le temps d'arrêt des pipelines et le coût de possession du stock. Pour mesurer la performance du modèle linéaire, trois instances ont été considérées : les deux premières instances portent sur le même réseau de pipeline qui se compose d'une source et de 6 destinations reliées au moyen de 3 pipelines, avec un horizon de planification de 90 heures. L'instance 3 comporte un horizon de 30 jours. Parmi lesquelles, les instances 1 et 3 sont initialement présentées dans (MirHassani and Jahromi, 2011). En réduisant le nombre total de lots à planifier, le modèle linéaire proposé permet de fournir des solutions en un temps de calcul plus faible que celui de (MirHassani and Jahromi, 2011) pour les instances 1 et 3. La comparaison sur la qualité de solutions entre les deux modèles n'a pas pu être effectuée, car les critères d'optimisation sont différents.

(Mostafaei et al., 2015) proposent également un modèle linéaire pour traiter un PORP-TS. Le modèle est basé sur une représentation continue du temps et du volume des lots. Il détermine, en plus du volume des lots, le volume envoyé d'un pipeline à un autre, et celui déchargé au niveau des destinations, en déterminant la position de chaque lot dans le réseau de pipelines à partir des coordonnées volumétriques. La fonction objectif du modèle se compose de 5 critères à minimiser : le coût de pompage, le coût lié au volume contaminé entre les lots successifs, la pénalité due aux demandes satisfaites avec retard, le coût relatif au temps d'arrêt des pipelines et le coût lié au redémarrage des pompes au niveau de la source. Le modèle est testé en utilisant

3 instances : la première et la troisième avec un horizon de 8 jours, et la deuxième avec horizon de 10 jours. Deux configurations du modèle sont considérées : la première considère au plus une seule opération de déchargement au niveau d'une destination lorsque le chargement d'un nouveau lot est effectué ; la seconde permet le déchargement de plusieurs lots en parallèle pour chaque opération de chargement d'un nouveau lot. De plus, plusieurs scénarios ont été créés à partir des 3 instances, en fixant un nombre maximum d'opérations de chargement des lots pour chaque scénario. Le modèle est résolu avec une limitation temporelle de 15 heures. Les résultats obtenus montrent que la deuxième configuration permet de fournir des solutions avec un coût de pompage plus faible que la première. De plus, le modèle avec la deuxième configuration nécessite un temps de résolution plus faible dans tous les scénarios considérés, notamment pour les scénarios des instances 2 et 3, où il fournit une solution au bout de 10 minutes en moyenne, alors qu'avec la première configuration, le modèle dépasse la limitation de 15 heures.

(Castro and Mostafaei, 2018) se focalisent sur un PORP-TS et proposent un modèle linéaire mixte pour l'étudier. Le modèle se base sur une représentation continue du temps et du volume. Son objectif est de fournir un ordonnancement des lots qui répond à une demande, en minimisant le temps de satisfaction de celle-ci. De plus, il considère comme contrainte additionnelle la compatibilité des produits. Le modèle est testé en se basant sur plusieurs instances présentées dans (Mostafaei et al., 2015), en variant la longueur de l'horizon de planification entre 9 et 13 jours. Le temps de calcul est limité à 5 heures. Les résultats obtenus prouvent que le modèle fournit la solution optimale pour les instances avec 9 et 10 jours en quelques minutes. Cependant, le modèle atteint la limitation temporelle fixée à 5 heures pour les instances avec un horizon supérieur à 11 jours, et aucune information sur le GAP n'est fournie. Par ailleurs, en considérant quatre instances, deux configurations du modèle sont adoptées : dans la configuration 1, la contrainte de compatibilité des produits n'est pas retenue dans le modèle ; dans la configuration 2, cette contrainte est prise en compte. Le résultat fourni montre qu'avec la configuration 2, le modèle parvient à fournir des solutions en un temps plus faible que la configuration 1 pour 2 instances, mais avec un temps de satisfaction des demandes plus long. De plus, la configuration 2 du modèle ne permet pas de trouver de solution pour la première instance, contrairement à la configuration 1.

(Liao et al., 2019b) développent un modèle linéaire mixte pour étudier le PORP-TS. Le modèle linéaire se base sur une formulation continue du temps et du volume : l'horizon temporel est divisé en plusieurs périodes dont la durée est à déterminer par le modèle. Par ailleurs, le modèle permet le chargement et le déchargement de plusieurs lots en parallèle durant chaque période. La fonction objectif consiste à minimiser le temps de satisfaction des demandes. Le modèle est testé en considérant 5 différentes instances présentées dans (Cafaro and Cerdá, 2011) et (Castro and Mostafaei, 2018). Ces instances possèdent un horizon de planification qui varie de 7 à 12 jours. Plusieurs scénarios ont été créés pour chaque instance en variant le nombre maximum de lots à planifier et le nombre de périodes. Le temps de

résolution du modèle est limité à 5 heures. Les résultats obtenus montrent que le modèle proposé permet de fournir des solutions ayant un temps de satisfaction des demandes plus faible que les modèles de (Cafaro and Cerdá, 2011) et (Castro and Mostafaei, 2018).

4.3.3 Conclusion par rapport aux articles étudiés

Le Tableau 4.1 récapitule les éléments communs entre les principaux travaux sur l'ordonnement des réseaux de pipelines. La première colonne de ce tableau comporte la référence des articles étudiés. La seconde colonne contient le type du réseau de pipeline étudié : soit « mesh-structure » ou « tree-structure ». Les colonnes suivantes sont regroupées en 3 axes pour faciliter la comparaison :

- les colonnes 3 à 6 concernent l'approche proposée : une méthode de simulation, une méthode exacte, une méthode approchée ou une méthode hybride ;
- les colonnes 7 à 9 représentent les aspects de la formulation du problème étudié :
 - les colonnes 7 et 8 illustrent respectivement la formulation du temps et du volume des lots. Ces dernières sont modélisées par des variables discrètes ou continues ;
 - la colonne 8 se rapporte aux critères d'optimisation utilisés dans la fonction objectif ;
- La colonne 10 concerne les spécifications des instances utilisées dans les études expérimentales, notamment la longueur de l'horizon de planification.

Parmi les travaux de la littérature, la quasi-totalité des articles traitent le problème d'ordonnement du réseau de pipeline dans le domaine pétrolier, et au meilleur de nos connaissances, aucun dans le domaine minier. On peut noter que la plupart des articles traitent le problème d'ordonnement du réseau de pipelines sous forme de « mesh-structure » (PORP-MS). Par ailleurs, il existe plusieurs instances étudiées pour les deux structures de réseau (« mesh-structure » et « tree-structure »). Cependant, la seule comparaison proposée dans les articles est effectuée par rapport au nombre de variables et de contraintes générées, et par rapport au temps de résolution, pour étudier le problème d'ordonnement du réseau des pipelines.

Concernant les critères d'optimisation, une liste exhaustive de ceux-ci est représentée par le Tableau 4.2. Au total, 14 critères d'optimisation sont utilisés dans les travaux étudiés traitant le PORP de type MS et de TS. A partir du Tableau 4.1, parmi les critères les plus utilisés figure ce qui suit : le Cr1 qui indique la minimisation du temps de satisfaction des demandes, pour éviter de livrer certaines d'entre-elles avec retard ; le Cr2 qui est lié à la minimisation du volume contaminé entre deux lots successifs ; et le Cr8 qui signifie la minimisation des coûts de pompage. Des similitudes peuvent être observées entre certains critères, par exemple entre Cr3 et Cr6 : ces deux critères ont pour objectif de maximiser la satisfaction des demandes dans les

délais fixés. Au contraire, d'autres critères peuvent être considérés comme opposés, à titre d'exemple Cr9 et Cr13 : alors que le premier a pour objectif de minimiser le coût de possession du stock, le second vise à maximiser le stock ayant le niveau le plus bas à la fin de l'horizon de planification.

Par rapport aux contraintes, on remarque que les contraintes conventionnelles utilisées par les travaux étudiés sont relatives à la gestion des stocks au niveau des raffineries et des destinations. Cependant, aucun article ne considère la polyvalence des stocks (i.e. un bac de stockage peut recevoir plusieurs produits durant l'horizon de planification). La plupart des articles prennent en considération les contraintes liées à la compatibilité entre les produits, en pénalisant l'utilisation de certaines séquences des produits, ou en les interdisant ((Herrán *et al.*, 2010), (MirHassani and Jahromi, 2011), (Cafaro and Cerdá, 2011), (Cafaro and Cerdá, 2012), (Mostafaei *et al.*, 2015), (Liao *et al.*, 2018), (Taherkhani *et al.*, 2020)). De plus, certains travaux introduisent des contraintes liées à l'augmentation du coût de l'électricité durant les heures de pointe, qui augmente les coûts de pompage ((Neves-Jr *et al.*, 2007) et (MirHassani and Jahromi, 2011)). Néanmoins, aucun article ne prend en compte les contraintes qui représentent la séparation entre les lots en utilisant un autre produit (par exemple de l'eau), afin d'éviter la contamination des produits.

En ce qui concerne la méthode de résolution, la majorité des travaux traitant le PORP-MS proposent des méthodes hybrides. Ceci revient au système étudié qui comporte plusieurs raffineries, destinations et pipeline, ce qui augmente la taille du problème, notamment avec des horizons de planification qui dépassent un mois. Les méthodes hybrides se composent généralement d'une méthode approchée et d'un modèle ((de la Cruz *et al.*, 2005), (Neves-Jr *et al.*, 2007), (Moura *et al.*, 2008), (Boschetto *et al.*, 2010), (de Souza Filho *et al.*, 2013), (Ribas *et al.*, 2013), (Magatão *et al.*, 2015)), ou sont sous forme d'un chainage entre deux modèles (Magatão *et al.*, 2012). Toutefois, certains articles traitant le même problème proposent un modèle ((Cafaro and Cerdá, 2010), (Herrán *et al.*, 2010), (Cafaro and Cerdá, 2012), (Taherkhani *et al.*, 2020)), mais en réalisant des tests sur un horizon qui ne dépasse pas 10 jours. La majorité des travaux sur le PORP-TS présentent un modèle linéaire ((Cafaro and Cerdá, 2011), (MirHassani and Jahromi, 2011), (Mostafaei *et al.*, 2015), (Liao *et al.*, 2019b)).

Au niveau de la formulation du problème, une partie des travaux adopte une représentation discrète du volume des lots. Ce dernier est déterminé soit en choisissant parmi un ensemble de volumes candidats, soit en découpant les pipelines en un ensemble de volumes fixes ((de la Cruz *et al.*, 2005), (Moura *et al.*, 2008), (Boschetto *et al.*, 2010), (Herrán *et al.*, 2010), (Lopes *et al.*, 2010), (Magatão *et al.*, 2012), (de Souza Filho *et al.*, 2013), (Ribas *et al.*, 2013)). D'autres travaux utilisent une représentation continue du volume des lots avec une borne minimale et une borne maximale ((Cafaro and Cerdá, 2010), (MirHassani and Jahromi, 2011), (Cafaro and Cerdá, 2012), (Magatão *et al.*, 2015), (Liao *et al.*, 2018)).

La plupart des travaux qui proposent un modèle optent pour une représentation continue du temps ((Cafaro and Cerdá, 2010), (MirHassani and Jahromi, 2011), (Cafaro and Cerdá, 2012), (Mostafaei et *al.*, 2015), (Liao et *al.*, 2019), (Taherkhani et *al.*, 2020)). Ceci permet, d'après (Liao et *al.*, 2018), de réduire la taille du modèle et de fournir des solutions de qualité en comparaison avec les modèles qui utilisent une représentation discrète. Cependant, tous les articles étudiés proposent un axe temporel situé au niveau des raffineries (sources), et déterminent les dates de début et de fin de chargement des lots.

Vu que le problème d'ordonnancement du réseau de pipelines de l'OCP est similaire au PORP-TS, alors les travaux de recherche effectués, dans ce cadre, concernent la proposition d'un modèle linéaire. Le modèle a pour objectif de fournir un ordonnancement des lots dans le réseau de pipelines sur un horizon bien déterminé. De plus, il détermine le volume de chaque bloc constituant un lot, qui permet de bien gérer les groupes de bacs à la Station Terminale. Le détail du modèle mathématique est présenté dans la section suivante.

Tableau 4.1 : Grille d'analyse des articles étudiés portant sur le problème d'ordonnancement des réseaux de pipelines

| Référence | Structure du système | Approche proposée | | | | Formulation du problème | | | Scénario |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------|
| | | Simulation | Méthode exacte | Méthode approchée | Méthode hybride | Formulation temporelle | Formulation du volume du lot | Fonction objectif | Horizon temporel (h) |
| de la Cruz et al., 2003 | « mesh-structure » | | | algorithme génétique | | discrète | discrète | Cr1, Cr2 | 80 (unités) |
| de la Cruz et al., 2005 | « mesh-structure » | | | | MILP + algorithme génétique | discrète | discrète | Cr1, Cr2 | 80 (unités) |
| Mori et al., 2007 | « mesh-structure » | simulation à événements discrets | | | | discrète | - | - | 480 |
| Neves-Jr et al., 2007 | « mesh-structure » | | | | heuristique + MILP | continue | discrète | Cr1, Cr3, Cr4, Cr5 | 720 |
| Garcia-Sanchez et al., 2008 | « tree-structure » | | | | simulation + recherche tabou | discrète | discrète | Cr2, Cr5, Cr6, Cr7 | 720 |
| Moura et al., 2008 | « mesh-structure » | | | | heuristique + CP | discrète | discrète | - | 240 |
| MirHassani and Ghorbanalizadeh, 2008 | « tree-structure » | | MILP | | | discrète | discrète | Cr2 | 72 |
| Cafaro and Cerdá, 2009 | « mesh-structure » | | MILP | | | continue | continue | Cr2, Cr5, Cr6, Cr8 | 240 |
| Boschetto et al., 2010 | « mesh-structure » | | | | heuristiques + MILP | continue | discrète | Cr1, Cr3 | 720 |
| Cafaro and Cerdá, 2010 | « mesh-structure » | | MILP | | | continue | continue | Cr1, Cr2, Cr6, Cr8 | 240 |
| Herrán et al., 2010 | « mesh-structure » | | MILP | | | discrète | discrète | Cr2, Cr5, Cr8, Cr9 | 100 |
| Arruda et al., 2010 | « mesh-structure » | | | | algorithme génétique + MILP | continue | discrète | Cr1, Cr15, Cr16, Cr17 | 720 |
| Lopes et al., 2010 | « mesh-structure » | | | | heuristique + CP | continue | discrète | - | 240 |
| Cafaro and Cerdá, 2011 | « tree-structure » | | MILP | | | continue | continue | Cr2, Cr5, Cr6, Cr8, Cr9 | 720 |

| | | | | | | | |
|------------------------------|--------------------|-------|-----------------------------|----------|----------|-----------------------------|-----|
| MirHassani and Jahromi, 2011 | « tree-structure » | MILP | | continue | continue | Cr2, Cr4, Cr8, Cr9 | 720 |
| Cafaro and Cerdá, 2012 | « mesh-structure » | MILP | | continue | continue | Cr1, Cr2, Cr6, Cr8, Cr9 | 240 |
| Magatão et al., 2012 | « mesh-structure » | | MILP + MILP | continue | discrète | Cr7, Cr10, Cr11, Cr12, Cr13 | 720 |
| de Souza Filho et al., 2013 | « mesh-structure » | | MILP + heuristique | discrète | discrète | Cr2, Cr8 | 168 |
| Ribas et al., 2013 | « mesh-structure » | | algorithme génétique + MILP | continue | discrète | Cr1, Cr2, Cr3 | 720 |
| Magatão et al., 2015 | « mesh-structure » | | heuristiques + MILP | continue | continue | Cr1, Cr7, Cr10 | 720 |
| Mostafaei et al., 2015 | « tree-structure » | MILP | | continue | continue | Cr2, Cr5, Cr6, Cr8, Cr14 | 240 |
| Liao et al., 2018 | « mesh-structure » | MINLP | | discrète | continue | Cr2, Cr4, Cr14 | 100 |
| Castro and Mostafaei, 2018 | « tree-structure » | MILP | | continue | continue | Cr1 | 312 |
| Liao et al., 2019 | « tree-structure » | MILP | | continue | continue | Cr1 | 288 |
| Taherkhani et al., 2020 | « mesh-structure » | MILP | | continue | continue | Cr2, Cr6, Cr8 | 240 |

Tableau 4.2 : Critères d'optimisation utilisés par les articles étudiés portant sur le problème d'ordonnement des réseaux de pipelines

| Code du critère | Critère d'optimisation |
|-----------------|--|
| Cr1 | minimiser le temps de satisfaction des demandes |
| Cr2 | minimiser le volume contaminé entre les lots successifs |
| Cr3 | minimiser le coût relatif à la livraison des produits en dehors des fenêtres de temps correspondantes |
| Cr4 | minimiser la variation du coût de l'électricité pendant les heures de pointe |
| Cr5 | minimiser le temps total d'arrêt des pipelines |
| Cr6 | minimiser les demandes livrées avec retard |
| Cr7 | minimiser les ruptures de stock |
| Cr8 | minimiser le coût de pompage |
| Cr9 | minimiser le coût de possession du stock |
| Cr10 | minimiser le coût relatif au non-respect de la capacité de stockage |
| Cr11 | minimiser la différence entre le volume total planifié par le premier MILP et le volume total considéré par le second MILP |
| Cr12 | minimiser le nombre total des lots planifiés |
| Cr13 | maximiser le stock ayant le niveau le plus bas à la fin de l'horizon de planification |
| Cr14 | minimiser le coût lié au redémarrage des pompes |
| Cr15 | minimiser le nombre d'interfaces entre les lots |
| Cr16 | minimiser le nombre de lots chargés en dehors des fenêtres de temps correspondantes |
| Cr17 | minimiser le nombre de lots déchargés en dehors des fenêtres de temps correspondantes |

4.4 Proposition d'un nouveau programme linéaire mixte pour le « PORP-TS » lié au cas OCP

Dans cette section, un modèle linéaire mixte est proposé pour un PORP-TS, et dont certains aspects de la modélisation ont été inspirés des modèles figurant dans la littérature, tel que celui de (Cafaro and Cerdá, 2011). Le modèle proposé a fait l'objet de deux publications aux conférences internationales : AMPS (Advances in Production Management Systems) en 2021 (Bamoumen et al., 2021) et IFAC MIM en 2022. On remarque que la majorité des articles proposant un modèle se basent sur un axe de temps au niveau des raffineries (sources), et se focalisent sur les dates de début et de fin de chargement des lots. Le modèle linéaire proposé dans ce chapitre utilise un seul axe du temps placé en aval, au niveau de la Station Terminale. La date « 0 » sur cet axe du temps correspond à la date de début de déchargement du premier lot à la Station Terminale. De plus, une fois l'horizon de planification atteint, il faut que tous les lots planifiés soient déchargés au niveau de la Station Terminale. Les dates de début et de fin de chargement de ces lots à la station de tête seront déterminées, en retranchant des dates de déchargement le temps de transport au niveau du pipeline principal.

En outre, le modèle proposé utilise une représentation continue du temps et du volume des lots. Chaque lot i possède une date de début de déchargement T_i , un volume Q_i et une durée de déchargement D_i . De plus, un lot est composé de plusieurs blocs j allant de 1 à NB ; chaque bloc j du lot i comporte un volume $BQ_{i,j}$ et une durée de déchargement $BD_{i,j}$. Le découpage

d'un lot en blocs est réalisé afin de faciliter la gestion du changement de bacs de stockage au niveau de Station Terminale. Le choix du groupe de stockage k ($k = 1, \dots, K$) à la Station dépend du produit p . Nous considérons un nombre total de $(NP + 1)$ produits numérotés de 0 à NP dont 0 désigne le produit séparateur de lots (l'eau), 1 le produit local, de 2 à NP produits d'export. Deux groupes de stockage (numérotés de 1 à 2) sont réservés pour stocker le produit 1 et 3 bacs du GE2 pour les produits d'export. Afin de faciliter la notation, les 3 bacs du GE2 sont modélisés séparément et numérotés de 3 à 5. Pour chaque groupe de stockage, le remplissage et la vidange des stocks peut s’effectuer simultanément ou séparément.

Le modèle comporte deux variables de décision pour la détermination des lots à planifier et du choix du groupe stockage pour un bloc :

- La variable binaire $y_{i,p}$ indique l’allocation du produit p au lot i ; elle est égale à 1 si le lot i contient le produit p ; 0 sinon ;
- La variable binaire $sz_{k,i,j}$ représente l’affectation d'un bloc de lot à un groupe de stockage à la Station Terminale ; elle vaut 1 si le bloc j du lot i sera déchargé au groupe de stockage k ; 0 sinon.

Les données d'entrée et les variables sont présentées dans la section (4.4.1). La section (4.4.2) détaille les différentes contraintes du modèle, et la section (4.4.3) comporte la fonction objectif.

4.4.1 Nomenclature

4.4.1.1 Notation des paramètres

| | | |
|--------------------|---|--|
| NP | : | nombre de produits (numérotés de 0 à NP , où 0 correspond à l’eau) |
| N | : | nombre maximum de lots |
| NB | : | nombre maximum de blocs pour un lot |
| K | : | nombre de groupe/bac de stockage |
| h_{max} | : | longueur de l’horizon d’ordonnancement (en heures) |
| db_{pp} | : | débit du pipeline principal |
| db_{ci} | : | débit du pipeline secondaire vers clients locaux (chimie) |
| db_{el} | : | débit du pipeline secondaire du groupe export 1 vers le groupe local (pipeline de transfert) |
| db_{ds} | : | débit du pipeline secondaire vers le Downstream |
| cap_{s_k} | : | capacité de stockage du groupe/bac k |
| $s_{init_v_k}$ | : | stock initial du groupe/bac de stockage k |
| $s_{init_prod_k}$ | : | produit contenu initialement dans le groupe/bac de stockage k |
| $Vmin_p/Vmax_p$ | : | volume minimum/maximum d’un lot comportant le produit p |
| dem_p | : | demande totale du produit p sur l’horizon de planification |
| vc_p | : | volume de rinçage (contaminé) reçu par le produit d’export p de basse qualité |
| $m_{p,q}$ | : | égale à 1 si le produit p et compatible avec le produit q pour deux lots successifs |

| | |
|---------------|---|
| $mr_{p,q}$ | : égale à 1 s'il existe un rinçage pour passer du produit de basse qualité p au produit de haute qualité q dans un bac du groupe export 2 |
| ρ | : coût relatif au nombre de blocs des lots |
| M | : nombre grand |
| ε | : epsilon (un très petit nombre) |
| α | : seuil sous lequel on considère que le bac d'un groupe de stockage est vide |

4.4.1.2 Notation des variables

- Variables continues :

| | |
|-----------------|--|
| Q_i | : volume du lot i |
| T_i | : date de début de déchargement du lot i |
| D_i | : durée de déchargement du batch i |
| nb_bloc | : nombre total de blocs des lots |
| $BQ_{i,j}$ | : volume du bloc j du lot i |
| $BD_{i,j}$ | : durée de déchargement du bloc j du lot i |
| $S_{k,i}$ | : stock du groupe/bac de stockage k avant le déchargement du lot i |
| $BS_{k,i,j}$ | : stock du groupe/bac de stockage k avant le déchargement du bloc j du lot i |
| $Qmin_i/Qmax_i$ | : volume minimum/maximum du lot i |
| $vs_{k,i,j}$ | : variation de stock du groupe/bac k durant le déchargement du bloc j du lot i |
| vp_i | : volume du produit contenu dans le lot i |
| $vpE_{i,p}$ | : volume total du produit p du lot i destiné à l'export (clients externes) |
| vp_total | : volume total des produits (K09L et produits d'export) |
| v_eau | : volume total d'eau envoyé durant l'horizon de planification |
| $s1dst_{i,j}$ | : durée de vidange du groupe local sans transfert lors du déchargement du bloc j du lot i |
| $s2dv_{i,j}$ | : durée de vidange du groupe export 1 lors du déchargement du bloc j du lot i |
| $g2Bdv_{k,i,j}$ | : durée de vidange du bac k du groupe export 2 durant le déchargement du bloc j du lot i |
| $SvrB_p$ | : somme des volumes de rinçage reçus en tant que produit de basse qualité |
| $SvrH_p$ | : somme des volumes de rinçage perdus en tant que produit de haute qualité |

- Variables binaires

| | |
|-----------------|--|
| $y_{i,p}$ | : égale à 1 si le lot i comporte le produit p ; 0 sinon |
| $z_{i,j}$ | : égale à 1 si le bloc j existe lors du déchargement du lot i ; 0 sinon |
| $sz_{k,i,j}$ | : égale à 1 si le bloc j du lot i est affecté au groupe/bac de stockage k lors du déchargement du lot i ; 0 sinon |
| $s2v_{i,j}$ | : égale à 1 si le groupe export 1 devient vide durant le déchargement du bloc j du lot i , 0 sinon |
| $g2Bdc_{k,i,j}$ | : égale à 1 si le bac k du groupe export 2 est en cours de vidange durant le déchargement du bloc j du lot i ; 0 sinon |

- $BSnv_{k,i,j}$: égale à 1 si le stock du groupe/bac de stockage k n'est pas vide avant le déchargement du bloc j du lot i ; 0 sinon
- $g2BpA_{k,i,j,p}$: égale à 1 si le bac k du groupe export 2 est utilisé pour stocker le produit p avant le déchargement du bloc j du lot i ; 0 sinon
- $g2BpB_{k,i,j,p}$: égale à 1 si le bac k du groupe export 2 est utilisé pour stocker le produit p après le déchargement du bloc j du lot i ; 0 sinon
- $vr_{k,i,j,p,q}$: égale à 1 si le bac k nécessite un rinçage entre les produits p et q ; 0 sinon
- Variables entières
- $cpBH_{k,i,j,p,q}$: égale à 3 s'il existe un changement du produit de basse qualité p au produit de haute qualité q pour le bac k lors du déchargement d'un bloc j du lot i

4.4.2 Contraintes du modèle :

Les contraintes du modèle linéaire sont divisées en 10 groupes comme suit :

- Groupe 1 (contraintes 1.1 à 1.3) : il s'agit des contraintes relatives à la fois à l'affectation des produits aux lots (contrainte 1.1), à la détermination du nombre des lots (contrainte 1.2), et à la définition des séquences autorisées entre les lots (contrainte 1.3).
- Groupe 2 (contraintes 2.1 à 2.4) : contraintes permet de déterminer le volume des lots.
- Groupe 3 (contraintes 3.1 à 3.11) : ces contraintes sont liées à la conservation du volume des lots (contraintes 3.1), à la détermination du volume minimum (contraintes 3.2 à 3.8.2) et de la borne maximale (contraintes 3.9 à 3.11) pour les blocs de lots.
- Groupe 4 (contraintes 4.1 à 4.9) : ces contraintes permettent de déterminer l'affectation des bacs/groupes de stockage aux blocs de lots (contraintes 4.1 à 4.8), et de définir le nombre total de blocs (contraintes 4.9).
- Groupe 5 (contraintes 5.1 à 5.8.7) : il s'agit de contraintes relatives à la gestion des bacs du groupe export 2, en déterminant leur durée de vidange (contraintes 5.1 à 5.5), l'affectation des bacs aux produits d'export (contraintes 5.6 à 5.7.8), et en définissant la variation du stock associée à ces bacs (contraintes 5.8.1 à 5.8.7).
- Groupe 6 (contraintes 6.1.1 à 6.8) : ces contraintes permettent de gérer le stockage au niveau du groupe local et du groupe export 1, à partir de la détermination de leur durée de vidange (contraintes 6.1.1 à 6.4.3), et de la détermination de leur variation de stockage durant le déchargement des blocs de lots (contraintes 6.5.1 à 6.8).
- Groupe 7 (contraintes 7.1.1 à 7.4.2) : ces contraintes sont liées à la mise à jour du stock pour les différents bacs/groupes après le déchargement des blocs de lots.
- Groupe 8 (contraintes 8.1 à 8.7) : il s'agit de contraintes permettant de déterminer les durées et les dates de début de déchargement des lots et de leurs blocs.
- Groupe 9 (contraintes 9.1 à 9.4.5) : ces contraintes concernent la détermination de la demande des produits d'export (contraintes 9.1 à 9.3), ainsi que le calcul du volume nécessaire au rinçage des bacs du groupe export 2 (contraintes 9.4.1 à 9.4.5).

- Groupe 10 (contraintes 10.1 à 10.6) : ce groupe des contraintes permettent de calculer les volumes globaux des produits de phosphate et de l'eau, envoyés durant l'horizon de planification.

4.4.2.1 Groupe de contraintes 1 : sélection du produit

4.4.2.1.1 Contraintes 1.1 : allocation des produits :

La variable binaire $y_{i,p}$ précise l'allocation du produit p au lot i . Un seul produit p est affecté à un lot i . Ceci se traduit par la contrainte ci-dessous :

$$\sum_{p=0,\dots,PN} y_{i,p} \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (1.1)$$

4.4.2.1.2 Contraintes 1.2 : limitation du nombre de lots :

La relation (1.2) permet de désactiver l'allocation des produits pour les lots non planifiés.

$$\sum_{p=0,\dots,PN} y_{i,p} \leq \sum_{p=0,\dots,PN} y_{i-1,p} \quad \forall i = 2, \dots, N \quad (1.2)$$

4.4.2.1.3 Contraintes 1.3 : compatibilité de produits entre deux lots successifs

La compatibilité des produits entre deux lots successifs est donnée par la matrice m . La valeur de $m_{p,q}$ est égal à « 1 » si la séquence successive des produits (p, q) est autorisée. Sinon, les deux produits ne sont pas compatibles. La contrainte (1.3) impose la compatibilité des deux lots successifs $(i - 1)$ et i , comportant respectivement les produits p et q :

$$y_{i-1,p} + y_{i,q} \leq 1 + m_{p,q} \quad \forall i = 2, \dots, N; p, q = 0, \dots, NP \quad (1.3)$$

4.4.2.2 Groupe de contraintes 2 : détermination du volume pour un lot

Comme représenté par la contrainte (2.1), deux variables $Qmin_i$ et $Qmax_i$ sont introduites pour définir l'intervalle du volume de lots. Le volume de lots Q_i doit être compris dans l'intervalle de $Qmin_i$ à $Qmax_i$.

$$Qmin_i \leq Q_i \leq Qmax_i \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (2.1)$$

Les deux bornes de l'intervalle dépendent du produit affecté au lot. La contrainte non linéaires (2.2) décrit la détermination de $Qmin_i$ et $Qmax_i$ selon le produit affecté : si le lot i contient le produit p (i.e. $y_{i,p} = 1$), alors la variable $Qmin_i$ est égale au volume minimum $Vmin_p$, et la variable $Qmax_i$ est égale au volume maximum $Vmax_p$.

$$\text{si } y_{ip} = 1 \begin{cases} Q_{\min_i} = V_{\min_p} \\ Q_{\max_i} = V_{\max_p} \end{cases} \quad \forall i = 1, \dots, N, p = 0, \dots, NP \quad (2.2)$$

La linéarisation de la contrainte (2.2) est réalisée en intégrant un grand nombre M , et donne lieu aux contraintes linéaires (2.3) et (2.4) représentées ci-dessous :

$$\begin{aligned} -M * (1 - y_{i,p}) + V_{\min_p} &\leq Q_{\min_i} \\ &\leq M * (1 - y_{i,p}) + V_{\min_p} \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N, p = 0, \dots, NP \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} -M * (1 - y_{i,p}) + V_{\max_p} &\leq Q_{\max_i} \\ &\leq M * (1 - y_{i,p}) + V_{\max_p} \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N, p = 0, \dots, NP \quad (2.4)$$

4.4.2.3 Groupe de contraintes 3 : déchargement d'un lot (en blocs)

4.4.2.3.1 Contraintes 3.1 : conservation de volume

La contrainte (3.1) traduit la conservation de volume d'un lot i , où la somme du volume des blocs correspond au volume du lot :

$$\sum_{j=1, \dots, BN} BQ_{i,j} = Q_i \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (3.1)$$

4.4.2.3.2 Contraintes 3.2 : détermination du volume minimum d'un bloc

On introduit une variable binaire auxiliaire : $z_{i,j} = 1$ si le bloc j existe pour le lot i . L'équation (3.2) impose l'existence du premier bloc si le lot i est planifié. La contrainte (3.3) décrit que l'existence d'un bloc suivant dépend du bloc précédent.

$$z_{i,1} = \sum_{p=0, \dots, PN} y_{i,p} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (3.2)$$

$$z_{i,j} \leq z_{i,j-1} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 2, \dots, NB \quad (3.3)$$

La contrainte (3.4) représente le couplage entre le volume du bloc j du lot i $BQ_{i,j}$ et la variable binaire $z_{i,j}$. Les contraintes (3.5) et (3.6) décrivent le couplage entre les variables binaires $y_{i,p}$ et $z_{i,j}$ pour les lots comportant l'eau et les produits d'export respectivement.

$$-M * z_{i,j} \leq BQ_{i,j} \leq M * z_{i,j} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB \quad (3.4)$$

$$-M * (1 - y_{i,0}) \leq z_{i,j} \leq M * (1 - y_{i,0}) \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 2, \dots, NB \quad (3.5)$$

$$-M * (1 - y_{i,p}) \leq z_{i,j} \leq M * (1 - y_{i,p}) \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 5, \dots, NB, p = 2 \dots NP \quad (3.6)$$

Les relations (3.7.1) et (3.7.2) représentent le volume minimum du premier bloc et des autres blocs d'un lot comportant le K09L respectivement.

$$-M * (1 - y_{i,1}) + db_pp \leq BQ_{i,1} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (3.7.1)$$

$$-M * (1 - y_{i,1}) + db_pp * z_{i,j} \leq BQ_{i,j} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 2, \dots, NB \quad (3.7.2)$$

Les relations (3.8.1) et (3.8.2) représentent le volume minimum du premier bloc $BQ_{i,1}$ et des autres blocs $BQ_{i,j}$ d'un lot comportant les produits d'export respectivement.

$$-M * (1 - y_{i,p}) + db_pp \leq BQ_{i,1} \quad \forall i = 1, \dots, N; p = 2 \dots NP \quad (3.8.1)$$

$$-M * (1 - y_{i,p}) + db_pp * z_{i,j} \leq BQ_{i,j} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 2, \dots, NB, p = 2 \dots NP \quad (3.8.2)$$

4.4.2.3.3 Contraintes 3.3 : détermination de la borne supérieure du volume d'un bloc

Les relations (3.9) et (3.10) décrivent que, pour un lot comportant de l'eau ($y_{i,0} = 1$), seul le premier bloc $BQ_{i,1}$ est utilisé, et les autres blocs sont désactivés.

$$-M * (1 - y_{i,0}) + Q_i \leq BQ_{i,1} \leq M * (1 - y_{i,0}) + Q_i \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (3.9)$$

$$-M * (1 - y_{i,0}) \leq BQ_{i,j} \leq M * (1 - y_{i,0}) \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 2, \dots, NB \quad (3.10)$$

La relation (3.11) montre pour les lots qui contiennent des produits d'export ($p = 2 \dots NP$), seuls les 4 premiers blocs sont activés.

$$-M * (1 - y_{i,p}) \leq BQ_{i,j} \leq M * (1 - y_{i,p}) \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 5, \dots, NB, p = 2 \dots NP \quad (3.11)$$

4.4.2.4 Groupe de contraintes 4 : déchargement d'un bloc vers un groupe/bac de stockage

On introduit une variable binaire : $sz_{k,i,j} = 1$ si un bloc j du lot i existe et est déchargé au groupe/bac de stockage k . La relation (4.1) montre qu'un seul stock k est affecté à chaque bloc j du lot i . La relation (4.2) signifie que si le bloc j du lot i n'existe pas (i.e. $z_{i,j} = 0$), alors il ne sera déchargé dans aucun bac/groupe de stockage k (i.e. $sz_{k,i,j} = 0$).

La variable $sz_{0,i,j}$ est introduite pour désigner le groupe de stockage fictif qui est alloué pour le déchargement des lots comportant de l'eau. Les contraintes (4.3.1) et (4.3.2) montrent qu'un lot comportant de l'eau ne possède qu'un seul bloc, auquel est affecté le groupe de stockage fictif.

$$\sum_{k=0, \dots, 5} sz_{k,i,j} = z_{i,j} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB \quad (4.1)$$

$$z_{i,j} = 0 \rightarrow sz_{k,i,j} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, N; j, k = 1 \dots 5 \quad (4.2)$$

$$sz_{0,i,1} = y_{i,0} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (4.3.1)$$

$$sz_{0,i,j} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 2, \dots, NB \quad (4.3.2)$$

Les contraintes (4.4) à (4.6) décrivent le couplage entre les deux variables binaires $sz_{k,i,j}$ et $y_{i,p}$. La relation (4.4) montre que si un lot comporte de l'eau ($p = 0$), alors aucun bac/groupe de stockage $k = 1, \dots, 5$ n'est affecté (i.e. $sz_{k,i,j} = 0$). La relation (4.5) interdit le déchargement d'un lot du K09L vers les 3 bacs de GE2, car seuls le groupe local et le groupe export 1 sont utilisés pour le déchargement du K09L. De la même manière, la relation (4.6) désactive le groupe local et le groupe export 1 pour le déchargement d'un lot comportant les produits d'export ($p = 2, \dots, NP$).

$$sz_{k,i,j} \leq 1 - y_{i,0} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k = 1, \dots, 5 \quad (4.4)$$

$$sz_{k,i,j} \leq 1 - y_{i,1} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k = 3, \dots, 5 \quad (4.5)$$

$$sz_{k,i,j} \leq 1 - \sum_{p=2, \dots, NP} y_{i,p} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k = 1, 2 \quad (4.6)$$

La relation (4.7) montre que deux blocs successifs j et $(j + 1)$ ne peuvent pas être déchargés dans un même stock k . La relation (4.8) permet de déterminer le niveau du stock k avant le déchargement du bloc j du lot i , représenté par la variable $BS_{k,i,j}$, en fonction de la variable binaire $sz_{k,i,j}$: si un stock k est affecté à un nouveau bloc $(j + 1)$ (i.e. $sz_{k,i,j+1} = 1$), alors le stock précédent $k' \neq k$ doit être rempli (i.e. $BS_{k',i,j+1} = cap_{S_{k'}}$).

$$sz_{k,i,j} + sz_{k,i,j+1} \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB - 1; k = 1 \dots 5 \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} sz_{k,i,j+1} = 1 \rightarrow cap_{S_{k'}} - M * (1 - sz_{k',i,j}) & \leq BS_{k',i,j+1} \\ & \leq cap_{S_{k'}} + M * (1 - sz_{k',i,j}) \end{aligned} \quad \begin{aligned} \forall i = 1, \dots, N; j & = 1 \dots (NB - 1); k \\ & = 1 \dots 5; k' \\ & = 1 \dots 5 \text{ et } k \neq k' \end{aligned} \quad (4.8)$$

La contrainte (4.9) détermine le nombre total de blocs des lots, noté nb_bloc , en fonction de la variable binaire $z_{i,j}$.

$$\sum_{i=1 \dots N, j=1 \dots NB} z_{i,j} = nb_bloc \quad (4.9)$$

4.4.2.5 Groupe de contraintes 5 : contraintes liées à la gestion des bacs du groupe export 2

4.4.2.5.1 Détermination de la durée de vidange du groupe export 2

Dans la relation (5.1), la variable $g2Bdv_{k,i,j}$ est introduite pour représenter la durée de vidange du bac k du groupe export 2, lors du déchargement du bloc j du lot i . Elle décrit que la somme des durées de vidange des bacs du groupe export 2, notée $\sum_{k=3..5} g2Bdv_{k,i,j}$, doit être inférieure ou égale à la durée de déchargement du bloc j du lot i , notée $BD_{i,j}$.

$$\sum_{k=3..5} g2Bdv_{k,i,j} \leq BD_{i,j} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k = 3, \dots, 5 \quad (5.1)$$

Les relations (5.2.1) à (5.2.3) introduisent une variable binaire auxiliaire : $g2Bdc_{k,i,j} = 1$ si le bac k est en cours de vidange durant le déchargement du bloc j du lot i ; 0 sinon. Les relations (5.2.1) et (5.2.2) décrivent la relation entre la durée de vidange du bac k du groupe export 2 $g2Bdv_{k,i,j}$ et la variable binaire $g2Bdc_{k,i,j}$: on considère que le bac k du groupe export 2 est en cours de déchargement (i.e. $g2Bdc_{k,i,j} = 1$) tant que sa durée de vidange est supérieure ou égale à un quart d'heure ; sinon, il devient vide (i.e. $g2Bdc_{k,i,j} = 0$). La relation (5.2.3) traduit que si le bloc j du lot i n'existe pas (i.e. $z_{i,j} = 0$), alors la variable binaire $g2Bdc_{k,i,j}$ lui correspondant est nulle.

$$\varepsilon * g2Bdv_{k,i,j} \leq g2Bdc_{k,i,j} < 1 + \varepsilon * g2Bdv_{k,i,j} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB \quad (5.2.1)$$

$$g2Bdc_{k,i,j} = 1 \rightarrow g2Bdv_{k,i,j} \geq 0.25 \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k = 3, \dots, 5 \quad (5.2.2)$$

$$z_{i,j} = 0 \rightarrow g2Bdc_{k,i,j} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k = 3, \dots, 5 \quad (5.2.3)$$

La relation (5.3) détermine la durée de vidange du bac k du groupe export 2 $g2Bdv_{k,i,j}$ dans le cas de déchargement du bloc d'un lot d'export (i.e. $sz_{k,i,j} = 1$) et de soutirage de ce bac (i.e. $g2Bdc_{k,i,j} = 1$) en même temps : la durée de vidange égale dans ce cas à la durée de déchargement du bloc $BD_{i,j}$.

$$\begin{aligned} -M(1 - sz_{k,i,j}) - M(1 - g2Bdc_{k,i,j}) + BD_{i,j} \\ \leq g2Bdv_{k,i,j} \\ \leq M(1 - sz_{k,i,j}) + M(1 - g2Bdc_{k,i,j}) \\ + BD_{i,j} \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k = 3, \dots, 5 \quad (5.3)$$

Les contraintes (5.4.1) et (5.4.2) traduisent le couplage entre la variable binaire $g2Bdc_{k,i,j}$ et la variable continu $g2Bdv_{k,i,j}$: si $g2Bdc_{k,i,j} = 0$, alors le bac k du groupe export 2 est vide, ce qui signifie que sa durée de vidange $g2Bdv_{k,i,j}$ est nulle ; sinon (i.e. $g2Bdc_{k,i,j} = 1$), alors cette durée de vidange est positive.

$$g2Bdc_{k,i,j} = 0 \rightarrow g2Bdv_{k,i,j} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k = 3, \dots, 5 \quad (5.4.1)$$

$$g2Bdc_{k,i,j} = 1 \rightarrow g2Bdv_{k,i,j} > 0 \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k = 3, \dots, 5 \quad (5.4.2)$$

La contrainte (5.5) traduit que si le lot en cours de déchargement comporte de l'eau (i.e. $y_{i,0} = 1$), alors la durée de vidange du bac k groupe export 2 $g2Bdv_{k,i,j}$ est nulle à partir du second bloc j , vu que le lot d'eau est composé uniquement d'un bloc.

$$y_{i,0} = 1 \rightarrow g2Bdv_{k,i,j} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 2, \dots, NB; k = 3, \dots, 5 \quad (5.5)$$

4.4.2.5.2 Affectation des bacs du groupe export 2 aux lots contenant les produits d'export

La contrainte (5.6) introduit une variable binaire auxiliaire : $BSnv_{k,i,j} = 1$ si le groupe/bac k n'est pas vide avant le déchargement du bloc j du lot i ; 0 sinon. Elle décrit la relation entre la variable binaire $BSnv_{k,i,j}$ et la variable représentant le niveau de stock k $BS_{k,i,j}$: si le niveau du stock est inférieur à un seuil α , alors il est considéré comme vide (i.e. $BSnv_{k,i,j} = 0$).

$$\frac{BS_{k,i,j} - \alpha}{cap_s_k} \leq BSnv_{k,i,j} < 1 + \frac{BS_{k,i,j} - \alpha}{cap_s_k} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k = 3, \dots, 5 \quad (5.6)$$

Vu que les bacs du groupe export 2 sont polyvalents, il est nécessaire de connaître le produit stocké dans chaque bac avant et après le déchargement d'un bloc. Dans le cas de changement d'un produit de basse qualité à un produit de haute qualité dans un bac, il faut un rinçage de celui-ci, afin d'éviter la contamination du produit de haute qualité.

De ce fait, la contrainte (5.7.1) introduit une variable binaire auxiliaire : $g2BpB_{k,i,j,p} = 1$ si le bac k du groupe export 2 est utilisé pour stocker le produit p après le déchargement du bloc j du lot i ; 0 sinon. Dans le cas où il y a le déchargement du bloc j du lot i ($sz_{k,i,j} = 1$), alors la variable binaire $g2BpB_{k,i,j,p}$ est déterminée par la relation (5.7.1). Dans le cas contraire (i.e. $sz_{k,i,j} = 0$), alors $g2BpB_{k,i,j,p}$ est reliée à la variable binaire $g2BpA_{k,i,j,p}$ introduite par la contrainte (5.7.2) : $g2BpA_{k,i,j,p} = 1$ si le bac k du groupe export 2 est utilisé pour stocker le produit p avant le déchargement du bloc j du lot i ; 0 sinon. Si le produit p est stocké dans le bac k du groupe export 2 avant le déchargement du bloc j du lot i (i.e. $g2BpA_{k,i,j,p} = 1$), et si le bac k n'est pas affecté à ce bloc (i.e. $sz_{k,i,j} = 0$), alors le produit stocké au niveau de ce bac reste le même (i.e. $g2BpB_{k,i,j,p} = 1$).

$$\begin{aligned} -M(1 - sz_{k,i,j}) + y_{i,p} &\leq g2BpB_{k,i,j,p} \\ &\leq M(1 - sz_{k,i,j}) + y_{i,p} \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k = 3, \dots, 5; p = 2, \dots, NP \quad (5.7.1)$$

$$\begin{aligned}
 -M * sz_{k,i,j} + g2BpA_{k,i,j,p} &\leq g2BpB_{k,i,j,p} & \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k \\
 &\leq M * sz_{k,i,j} + g2BpA_{k,i,j,p} & = 3, \dots, 5; p \\
 & & = 2, \dots, NP
 \end{aligned} \quad (5.7.2)$$

La contrainte (5.7.3) décrit la relation entre les deux variables binaires $g2BpA_{k,i,j,p}$ et $g2BpB_{k,i,j,p}$ pour les blocs de chaque lot i : le produit p après le déchargement du bloc $(j - 1)$ du lot i est le même qu'avant le déchargement du bloc suivant j du lot i . La contrainte (5.7.4) traduit la relation entre ces deux variables binaires pour le premier et dernier bloc de chaque paire de lots successifs i et $(i + 1)$. La contrainte (5.7.5) indique que si le stock k du groupe export 2 n'est pas vide avant le déchargement du bloc j du lot i (i.e. $BSnv_{k,i,j} = 1$), alors les deux variables binaires $g2BpA_{k,i,j,p}$ et $g2BpB_{k,i,j,p}$ possèdent la même valeur.

$$\begin{aligned}
 g2BpA_{k,i,j,p} = g2BpB_{k,i,j-1,p} & & \forall i = 1, \dots, N; j = 2, \dots, NB; k \\
 & & = 3, \dots, 5; p \\
 & & = 2, \dots, NP
 \end{aligned} \quad (5.7.3)$$

$$\begin{aligned}
 g2BpA_{k,i,1,p} = g2BpB_{k,i-1,NB,p} & & \forall i = 2, \dots, N; k = 3, \dots, 5; p \\
 & & = 2, \dots, NP
 \end{aligned} \quad (5.7.4)$$

$$\begin{aligned}
 BSnv_{k,i,j} = 1 \rightarrow g2BpA_{k,i,j,p} = g2BpB_{k,i,j,p} & & \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k \\
 & & = 3, \dots, 5; p \\
 & & = 2, \dots, NP
 \end{aligned} \quad (5.7.5)$$

La contrainte (5.7.6) détermine le choix du bac k (du groupe export 2) pour le déchargement du bloc j d'un lot i comportant un produit d'export. Elle décrit la relation entre $sz_{k,i,j}$ et les variables binaires $BSnv_{k,i,j}$, $y_{i,p}$ et $g2BpA_{k,i,j,p}$: si le bac k n'est pas vide avant le déchargement du bloc j du lot i (i.e. $BSnv_{k,i,j} = 1$), et si ce bac contient le produit p en déchargement (i.e. $y_{i,p} = g2BpA_{k,i,j,p} = 1$), alors il peut être affecté au bloc j du lot i .

$$\begin{aligned}
 sz_{k,i,j} &\leq M(1 - y_{i,p}) + M * (1 - BSnv_{k,i,j}) & \forall i = 2, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k \\
 &+ g2BpA_{k,i,j,p} & = 3, \dots, 5; p \\
 & & = 2, \dots, NP
 \end{aligned} \quad (5.7.6)$$

Les contraintes (5.7.7) et (5.7.8) traduisent que chaque bac k du groupe export 2 ne peut contenir qu'un seul produit d'export lors du déchargement du bloc j du lot i .

$$\begin{aligned}
 \sum_{p=2}^{NP} g2BpA_{k,i,j,p} = 1 & & \forall i = 1, \dots, N; j \\
 & & = 1, \dots, NB; k \\
 & & = 3, \dots, 5
 \end{aligned} \quad (5.7.7)$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{p=2}^{NP} g2BpB_{k,i,j,p} = 1 & & \forall i = 1, \dots, N; j \\
 & & = 1, \dots, NB; k \\
 & & = 3, \dots, 5
 \end{aligned} \quad (5.7.8)$$

4.4.2.5.3 Détermination de la variation du stock pour les bacs du groupe export 2

Les contraintes (5.8.1) à (5.8.7) décrivent la variation de stock au niveau du bac k du groupe export 2 durant le déchargement du bloc j du lot i , notée $vs_{k,i,j}$. On distingue trois cas possibles : le déchargement d’un lot comportant de l’eau ; le déchargement d’un lot contenant le produit local K09L ; et le déchargement d’un lot qui contient un produit d’export.

En effet, la contrainte (5.8.1) représente la variation du stock $vs_{k,i,1}$ dans le cas du déchargement d’un lot qui comporte de l’eau. La contrainte (5.8.2) détermine la variation du stock $vs_{k,i,j}$ dans le cas où un lot contenant le produit K09L est en cours de déchargement.

$$\begin{aligned} -M * (1 - y_{i,0}) - db_ds * g2Bdv_{k,i,1} &\leq vs_{k,i,1} & \forall i = 1, \dots, N; k = 3, \dots, 5 \\ &\leq M * (1 - y_{i,0}) - db_ds * g2Bdv_{k,i,1} \end{aligned} \quad (5.8.1)$$

$$\begin{aligned} -M * (1 - y_{i,1}) - db_ds * g2Bdv_{k,i,j} &\leq vs_{k,i,j} & \forall i = 1, \dots, N; j \\ &\leq M * (1 - y_{i,1}) - db_ds * g2Bdv_{k,i,j} & = 1, \dots, NB; k \\ & & = 3, \dots, 5 \end{aligned} \quad (5.8.2)$$

Les contraintes (5.8.3) à (5.8.5) décrivent la variation de stock $vs_{k,i,j}$ lors du déchargement d’un lot comportant un produit d’export. Deux cas se présentent : le premier cas concerne le déchargement du lot et la vidange du bac en même temps (contraintes (5.8.3) et (5.8.4) ; le second cas concerne le déchargement du lot seul (contrainte (5.8.5)).

$$\begin{aligned} -M(1 - sz_{k,i,j}) - M(1 - g2Bdc_{k,i,j}) \\ + (db_pp - db_ds) BD_{i,j} &\leq vs_{k,i,j} & \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k \\ &\leq M(1 - sz_{k,i,j}) + M(1 - g2Bdc_{k,i,j}) & = 3, \dots, 5 \\ + (db_pp - db_ds) BD_{i,j} \end{aligned} \quad (5.8.3)$$

$$\begin{aligned} -M * (1 - sz_{k,i,j}) - db_ds * g2Bdv_{k,i,j} + BQ_{i,j} \\ \leq vs_{k,i,j} & \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k \\ \leq M * (1 - sz_{k,i,j}) - db_ds & = 3, \dots, 5 \\ * g2Bdv_{k,i,j} + BQ_{i,j} \end{aligned} \quad (5.8.4)$$

$$\begin{aligned} -M(1 - sz_{k,i,j}) - M(g2Bdc_{k,i,j}) + db_pp * BD_{i,j} \\ \leq vs_{k,i,j} & \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k \\ \leq M(1 - sz_{k,i,j}) + M(g2Bdc_{k,i,j}) & = 3, \dots, 5 \\ + db_pp * BD_{i,j} \end{aligned} \quad (5.8.5)$$

La contrainte (5.8.6) représente la variation du stock $vs_{k,i,j}$ si uniquement la vidange du bac k est effectuée, et si le bac n’est pas encore vide.

$$\begin{aligned} -M * sz_{k,i,j} - db_ds * g2Bdv_{k,i,j} &\leq vs_{k,i,j} & \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k \\ &\leq M * sz_{k,i,j} - db_ds * g2Bdv_{k,i,j} & = 3, \dots, 5 \end{aligned} \quad (5.8.6)$$

La relation (5.8.7) montre que si le bac k du groupe export 2 ne se vide pas (i.e. $g2Bdc_{k,i,j} = 0$), alors le déchargement du bloc d’un lot au niveau de ce bac peut toujours avoir lieu. De ce fait, la variation du stock $vs_{k,i,j}$ peut être positive ou nulle.

$$g2Bdc_{k,i,j} = 0 \rightarrow vs_{k,i,j} \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall i = 1, \dots, N; j \\ = 1, \dots, NB; k \\ = 3, \dots, 5 \end{array} \quad (5.8.7)$$

4.4.2.6 Groupe de contraintes 6 : contraintes liées à la gestion du groupe local et du groupe export 1

4.4.2.6.1 Détermination de la durée de vidange du groupe local et du groupe export 1

Dans cette partie, deux variables sont introduites liées au groupe local et au groupe export 1 : la variable $s2dv_{i,j}$ désigne la durée de vidange du groupe export 1 lors du déchargement du bloc j du lot i ; la variable $s1dst_{i,j}$ représente la durée de vidange du groupe local pendant le déchargement du bloc j du lot i . Trois cas possibles sont distingués pour la détermination de la durée de vidange du groupe export 1 : le déchargement d'un lot contenant de l'eau (cas 1) ; le déchargement d'un lot qui comporte un produit d'export (cas 2) ; et le déchargement d'un lot qui contient le produit local K09L (cas 3).

a.) Détermination de la durée de vidange du groupe export 1

- Cas 1 : déchargement d'un lot comportant de l'eau

La contrainte (6.1.1) et (6.1.2) déterminent la durée de vidange du groupe export 1 $s2dv_{i,j}$ dans le cas où le déchargement d'un lot qui comporte de l'eau ($y_{i,0} = 1$) a lieu.

$$\begin{aligned} -M * (1 - y_{i,0}) + \frac{1}{db_el} BS_{2,i,1} &\leq s2dv_{i,1} & \forall i = 1, \dots, N & \quad (6.1.1) \\ &\leq M * (1 - y_{i,0}) + \frac{1}{db_el} BS_{2,i,1} \end{aligned}$$

$$-M * (1 - y_{i,0}) \leq s2dv_{i,j} \leq M * (1 - y_{i,0}) \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 2, \dots, NB \quad (6.1.2)$$

- Cas 2 : déchargement d'un lot contenant un produit d'export

La contrainte (6.2) détermine la durée de vidange du groupe export 1 $s2dv_{i,j}$ dans le cas du déchargement d'un lot qui comporte un produit d'export.

$$-M * (1 - y_{i,p}) \leq s2dv_{i,j} \leq M * (1 - y_{i,p}) \quad \begin{array}{l} \forall i = 1, \dots, N; j = 5, \dots, NB; p \\ = 2, \dots, NP \end{array} \quad (6.2)$$

- Cas 3 : déchargement d'un lot comportant le produit local K09L

Les contraintes (6.3.1) et (6.3.2) représentent la durée de vidange du groupe export 1 $s2dv_{i,j}$ dans le cas du déchargement d'un lot qui comporte le produit K09L. Deux situations sont distinguées : dans la première, si le groupe export 1 est choisi pour contenir le bloc j du lot i (i.e. $sz_{2,i,j} = 1$), alors la durée de vidange égale à la durée de déchargement de ce bloc BD_{ij} . Dans la seconde situation, si le groupe local est choisi (i.e. $sz_{1,i,j} = 1$), alors la durée de

vidange du groupe export 1 $s2dv_{i,j}$ est déterminé en divisant le niveau de stock $BS_{2,i,j}$ par le débit de transfert db_el .

$$\begin{aligned} -M * (1 - sz_{2,i,j}) + BD_{i,j} &\leq s2dv_{i,j} \\ &\leq M * (1 - sz_{2,i,j}) + BD_{i,j} \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB \quad (6.3.1)$$

$$\begin{aligned} -M * (1 - sz_{1,i,j}) + \frac{1}{db_el} BS_{2,i,j} &\leq s2dv_{i,j} \\ &\leq M * (1 - sz_{1,i,j}) + \frac{1}{db_el} BS_{2,i,j} \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB \quad (6.3.2)$$

b.) Détermination de la durée de vidange du groupe local

Les contraintes (6.4.1) à (6.4.3) permettent de définir la durée de vidange du groupe local $s1dst_{i,j}$. Celle-ci peut être déterminée selon deux cas possibles : le premier cas considère que le transfert du produit K09L entre le groupe local et le groupe export 1 a lieu ; alors que dans le second cas, ce transfert n’est pas réalisé. On introduit pour cela une variable binaire auxiliaire : $s2v_{i,j} = 1$ si le groupe export 1 devient vide durant le déchargement du bloc j du lot i (remplissage du groupe local sans transfert), 0 sinon. La contrainte (6.4.1) traduit la relation entre la variable binaire $s2v_{i,j}$, la durée de déchargement du bloc j du lot i $BD_{i,j}$ et la durée de vidange du groupe export 1 $s2dv_{i,j}$.

$$\begin{aligned} \varepsilon * (BD_{i,j} - s2dv_{i,j}) &\leq s2v_{i,j} \\ &< 1 + \varepsilon * (BD_{i,j} - s2dv_{i,j}) \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB \quad (6.4.1)$$

Les contraintes (6.4.2) et (6.4.3) déterminent la durée de vidange du groupe local sans transfert $s1dst_{i,j}$. Celle-ci est nulle si la durée de vidange du groupe export 1 $s2dv_{i,j}$ est supérieure à la durée de déchargement du bloc j du lot i $BD_{i,j}$ (i.e. $s2v_{i,j} = 0$) (voir contrainte (6.4.2)). Dans le cas contraire, c’est-à-dire si $s2dv_{i,j} < BD_{i,j}$, la durée de vidange $s1dst_{i,j}$ égale à la différence $BD_{i,j} - s2dv_{i,j}$ (voir contrainte (6.4.3))

$$-M * (s2v_{i,j}) \leq s1dst_{i,j} \leq M * (s2v_{i,j}) \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB \quad (6.4.2)$$

$$\begin{aligned} -M * (1 - sv_{2,i,j}) + (BD_{ij} - s2dv_{i,j}) &\leq s1dst_{i,j} \\ &\leq M * (1 - sv_{2,i,j}) + (BD_{ij} - s2dv_{i,j}) \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB \quad (6.4.3)$$

4.4.2.6.2 Détermination de la variation de stock du groupe local et du groupe export 1 durant le déchargement d’un bloc

Dans cette partie, deux variables sont introduites pour gérer le stock du groupe local et du groupe export 1 : la variable $vs_{1,i,j}$ indique la variation du stock du groupe local ($k = 1$) pendant le déchargement du bloc j du lot i ; la variable $vs_{2,i,j}$ désigne variation du stock du groupe export 1 ($k = 2$) lors du déchargement du bloc j du lot i . On différencie entre trois cas possibles pour la détermination de ces deux variables : le déchargement d’un lot d’eau (cas 1) ;

le déchargement comportant un produit d'export (cas 2) ; et le déchargement d'un lot contenant le produit local K09L (cas 3).

a.) Cas 1 : déchargement d'un lot d'eau

○ Variation du stock du groupe local

Les contraintes (6.5.1) et (6.5.2) déterminent la variation de stock $vs_{1,i,1}$ du groupe local lors du déchargement d'un lot contenant de l'eau ($y_{i,0} = 1$), selon deux cas : si le groupe export 1 a été vidé (i.e. $s2v_{i,1} = 1$) (contrainte (6.5.1)) ; si le groupe export 1 n'est pas vide (i.e. $s2v_{i,1} = 0$) (voir contrainte (6.5.2)).

$$\begin{aligned} -M * (1 - y_{i,0}) - M(1 - s2v_{i,1}) - (db_ci \\ - db_el) s2dv_{i,1} - db_ci * s1dst_{i,1} \\ \leq vs_{1,i,1} \\ \leq M * (1 - y_{i,0}) + M(1 - s2v_{i,1}) \\ - (db_ci - db_el) s2dv_{i,1} - db_ci \\ * s1dst_{i,1} \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (6.5.1)$$

$$\begin{aligned} -M * (1 - y_{i,0}) - M * s2v_{i,1} - (db_ci - db_el) BD_{i,1} \\ \leq vs_{1,i,1} \\ \leq M * (1 - y_{i,0}) + M * s2v_{i,1} - (db_ci \\ - db_el) BD_{i,1} \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (6.5.2)$$

○ Variation du stock du groupe export 1

Les contraintes (6.5.3) et (6.5.4) déterminent la variation de stock $vs_{2,i,1}$ du groupe export 1 lors du déchargement d'un lot contenant de l'eau ($y_{i,0} = 1$), selon deux cas : si le groupe export 1 a été vidé ($s2v_{i,1} = 1$) (contrainte (6.5.3)) ; si le groupe export 1 n'est pas vide ($s2v_{i,1} = 0$) (contrainte (6.5.4)).

$$\begin{aligned} -M * (1 - y_{i,0}) - M(1 - s2v_{i,1}) - db_el * s2dv_{i,1} \\ \leq vs_{2,i,1} \\ \leq M * (1 - y_{i,0}) + M(1 - s2v_{i,1}) \\ - db_el * s2dv_{i,1} \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (6.5.3)$$

$$\begin{aligned} -M * (1 - y_{i,0}) - M * s2v_{i,1} - db_el * BD_{i,1} \leq vs_{2,i,1} \\ \leq M * (1 - y_{i,0}) + M * s2v_{i,1} - db_el \\ * BD_{i,1} \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (6.5.4)$$

b.) Cas 2 : déchargement d'un lot contenant un produit d'export

○ Variation du stock du groupe local

La contrainte (6.6.1) détermine la variation du stock $vs_{1,i,j}$ du groupe local durant le déchargement d'un lot contenant un produit d'export (i.e. $y_{i,p} = 1 \quad \forall p = 2, \dots, NP$).

$$\begin{aligned}
 -M * (1 - y_{i,p}) - (db_ci - db_el) s2dv_{i,j} - db_ci \\
 * s1dst_{i,j} \leq vs_{1,i,j} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, 3; p \\
 \leq M * (1 - y_{i,p}) - (db_ci \\
 - db_el) s2dv_{i,j} - db_ci * s1dst_{i,j} \quad = 2, \dots, NP
 \end{aligned} \quad (6.6.1)$$

○ Variation du stock du groupe export 1

Les contraintes (6.6.2) et (6.6.3) déterminent la variation de stock $vs_{2,i,j}$ du groupe export 1 dans le cas du déchargement d’un lot qui comporte un produit d’export (i.e. $y_{i,p} = 1 \forall p = 2, \dots, NP$), selon deux cas : si le groupe export 1 a été vidé ($s2v_{i,j} = 1$) (contrainte (6.6.2)) ; si le groupe export 1 n’est pas vide ($s2v_{i,j} = 0$) (contrainte (6.6.3)).

$$\begin{aligned}
 -M * (1 - y_{i,p}) - M(1 - s2v_{i,j}) - db_el * s2dv_{i,j} \\
 \leq vs_{2,i,j} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, 3; p \\
 \leq M * (1 - y_{i,p}) + M(1 - s2v_{i,j}) \\
 - db_el * s2dv_{i,j} \quad = 2, \dots, NP
 \end{aligned} \quad (6.6.2)$$

$$\begin{aligned}
 -M * (1 - y_{i,p}) - M * s2v_{i,j} - db_el * BD_{i,j} \leq vs_{2,i,j} \\
 \leq M * (1 - y_{i,p}) + M * s2v_{i,j} - db_el \\
 * BD_{i,j} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, 3; p \\
 = 2, \dots, NP
 \end{aligned} \quad (6.6.3)$$

c.) Cas 3 : déchargement d’un lot comportant le produit local K09L

○ Variation du stock du groupe local

La contrainte (6.7.1) représente la variation de stock $vs_{1,i,j}$ du groupe local lors du déchargement d’un lot contenant le produit K09L ($y_{i,1} = 1$), dans le cas où le déchargement du bloc j du lot i s’effectue au niveau du groupe export 1 ($sz_{2,i,j} = 1$). Par conséquent, la durée de vidange du groupe local sans transfert $s1dst_{i,j}$ est nulle (voir contrainte (11.8.2)).

$$\begin{aligned}
 -M * (1 - sz_{2,i,j}) - (db_ci - db_el) BD_{i,j} \leq vs_{1,i,j} \\
 \leq M * (1 - sz_{2,i,j}) - (db_ci \\
 - db_el) BD_{i,j} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB
 \end{aligned} \quad (6.7.1)$$

$$\begin{aligned}
 -M * (1 - sz_{2,i,j}) \leq s1dst_{i,j} \leq M * (1 - sz_{2,i,j}) \\
 \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, 3; p \\
 \quad = 2, \dots, NP
 \end{aligned} \quad (6.7.2)$$

Les contraintes (6.7.3) et (6.7.4) représentent la variation de stock $vs_{1,i,j}$ du groupe local lors du déchargement d’un lot contenant le produit K09L ($y_{i,1} = 1$), dans le cas où le déchargement bloc j du lot i est réalisé au niveau du groupe local (i.e. $sz_{1,i,j} = 1$). Deux situations sont distinguées : si le groupe export 1 a été vidé (i.e. $s2v_{i,j} = 1$) (contrainte (6.7.3)) ; si le groupe export 1 n’est pas vide (i.e. $s2v_{i,j} = 0$) (contrainte (6.7.4)).

$$\begin{aligned}
 & -M * (1 - sz_{1,i,j}) - M(1 - s2v_{i,j}) + (db_pp - db_ci \\
 & \quad - db_el) s2dv_{i,j} + (db_pp \\
 & \quad - db_ci) s1dst_{i,j} \leq vs_{1,i,j} \\
 & \leq M * (1 - sz_{1,i,j}) + M(1 - s2v_{i,j}) \\
 & \quad + (db_pp - db_ci - db_el) s2dv_{i,j} \\
 & \quad + (db_pp - db_ci) s1dst_{i,j}
 \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB \quad (6.7.3)$$

$$\begin{aligned}
 & -M * (1 - sz_{1,i,j}) - M * s2v_{i,j} + (db_pp - db_ci \\
 & \quad - db_el) BD_{i,j} \leq vs_{1,i,j} \\
 & \leq M * (1 - sz_{1,i,j}) + M * s2v_{i,j} \\
 & \quad + (db_pp - db_ci - db_el) BD_{i,j}
 \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB \quad (6.7.4)$$

○ Variation du stock du groupe export 1

La contrainte (6.7.5) détermine la variation de stock $vs_{2,i,j}$ du groupe export 1 lors du déchargement d'un lot qui comporte le produit K09L ($y_{i,1} = 1$), dans le cas où le déchargement bloc j du lot i s'effectue au niveau du groupe export 1 (i.e. $sz_{2,i,j} = 1$).

$$\begin{aligned}
 & -M * (1 - sz_{2,i,j}) + (db_pp - db_el) BD_{i,j} \leq vs_{2,i,j} \\
 & \leq M * (1 - sz_{2,i,j}) + (db_pp \\
 & \quad - db_el) BD_{i,j}
 \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB \quad (6.7.5)$$

Les contraintes (6.7.6) et (6.7.7) déterminent la variation de stock $vs_{2,i,j}$ du groupe export 1 lors du déchargement d'un lot contenant le produit K09L ($y_{i,1} = 1$), dans le cas où le déchargement du bloc j du lot i s'effectue au niveau du groupe local (i.e. $sz_{1,i,j} = 1$). Deux situations se présentent : si le groupe export 1 a été vidé (i.e. $s2v_{i,j} = 1$) (contrainte (11.8.6)) ; si le groupe export 1 n'est pas vide (i.e. $s2v_{i,j} = 0$) (voir contrainte (11.8.7)).

$$\begin{aligned}
 & -M * (1 - sz_{1,i,j}) - M(1 - s2v_{i,j}) - db_el * s2dv_{i,j} \\
 & \leq vs_{2,i,j} \\
 & \leq M * (1 - sz_{1,i,j}) + M(1 - s2v_{i,j}) \\
 & \quad - db_el * s2dv_{i,j}
 \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB \quad (6.7.6)$$

$$\begin{aligned}
 & -M * (1 - sz_{1,i,j}) - M(s2v_{i,j}) - db_el * BD_{i,j} \\
 & \leq vs_{2,i,j} \\
 & \leq M * (1 - sz_{1,i,j}) + M(s2v_{i,j}) - db_el \\
 & \quad * BD_{i,j}
 \end{aligned} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB \quad (6.7.7)$$

La contrainte (6.8) traduit la relation entre la variation de stock $vs_{k,i,j}$ et la variable binaire $z_{i,j}$: si le bloc j du lot i n'existe pas (i.e. $z_{i,j} = 0$), alors la variation $vs_{k,i,j}$ lui correspondant est nulle.

$$-M * z_{i,j} \leq vs_{k,i,j} \leq M * z_{i,j} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k = 1, \dots, K \quad (6.8)$$

4.4.2.7 Groupe de contraintes 7 : mise à jour des stocks après le déchargement d’un bloc

Les contraintes (7.1.1) et (7.1.2) traduisent l’affectation du stock initial et du produit initial pour chaque groupe/bac de stockage k .

$$S_{k,1} = s_{init_v_k} \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (7.1.1)$$

$$g2BpA_{k1,1,p} = 1 \quad \begin{aligned} \forall k = 1, \dots, K; p \\ = s_{init_prod_k} \end{aligned} \quad (7.1.2)$$

Les contraintes (7.2.1) à (7.2.3) décrivent la mise à jour des stocks pour chaque groupe/bac k , représentés par les variables $BS_{k,i,j}$ et $S_{k,i}$.

$$BS_{k,i,1} = S_{k,i} \quad \forall i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K \quad (7.2.1)$$

$$BS_{k,i,j+1} = BS_{k,i,j} + v_{S_{k,i,j}} \quad \begin{aligned} \forall i = 1, \dots, N; j \\ = 1, \dots, NB \\ - 1; k \\ = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (7.2.2)$$

$$S_{k,i+1} = BS_{k,i,NB} + v_{S_{k,i,NB}} \quad \forall i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K \quad (7.2.3)$$

Les contraintes (7.3.1) et (7.3.2) définissent la borne inférieure et la borne supérieure pour les deux variables de stock $BS_{k,i,j}$ et $S_{k,i}$.

$$0 \leq S_{k,i} \leq cap_s_k \quad \begin{aligned} \forall i = 1, \dots, N + 1; k \\ = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (7.3.1)$$

$$0 \leq BS_{k,i,j} \leq cap_s_k \quad \begin{aligned} \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k \\ = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (7.3.2)$$

La contrainte (7.3.3) montre la relation entre la variation du stock $v_{S_{k,i,j}}$ et le niveau du stock $BS_{k,i,j}$: leur somme désigne le niveau de stock du groupe/bac k après le déchargement du bloc j du lot i . Sa valeur doit être positive et inférieure ou égale à la capacité de stockage cap_s_k . La contrainte (7.3.4) définit les bornes inférieure et supérieure pour la variable $v_{S_{k,i,j}}$. On peut noter que la valeur négative de cette variable désigne une opération de vidange du groupe/bac.

$$0 \leq v_{S_{k,i,j}} + BS_{k,i,j} \leq cap_s_k \quad \begin{aligned} \forall i = 1, \dots, N; j \\ = 1, \dots, NB; k \\ = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (7.3.3)$$

$$-cap_s_k \leq v_{S_{k,i,j}} \leq cap_s_k \quad \begin{aligned} \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k \\ = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (7.3.4)$$

Les contraintes (7.4.1) et (7.4.2) décrivent la relation entre la variation du stock $v_{S_{k,i,j}}$ et la variation binaire $sz_{k,i,j}$: si le groupe/bac k est choisi pour contenir le bloc j du lot i (i.e.

$sz_{k,i,j} = 1$), alors la variation du stock $vs_{k,i,j}$ lui correspondant doit être positive (voir contrainte (7.4.1)) ; dans le cas contraire (i.e. $sz_{k,i,j} = 0$), alors la variation du stock $vs_{k,i,j}$ peut être négative ou nulle (voir contrainte (7.4.2)).

$$sz_{k,i,j} = 1 \rightarrow vs_{k,i,j} > 0 \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k = 1, \dots, K \quad (7.4.1)$$

$$sz_{k,i,j} = 0 \rightarrow vs_{k,i,j} \leq 0 \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB; k = 1, \dots, K \quad (7.4.2)$$

4.4.2.8 Groupe de contraintes 8 : détermination des durées et des dates de début de déchargement des lots

Les relations (8.1) et (8.2) représentent respectivement la durée de déchargement du bloc j du lot i , notée $BD_{i,j}$, ainsi que la durée de déchargement du lot i , notée D_i . La durée de déchargement d'un bloc $BD_{i,j}$ est déterminée à partir du volume $BD_{i,j}$.

$$db_pp * BD_{i,j} = BQ_{i,j} \quad \forall i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, NB \quad (8.1)$$

$$D_i = \sum_{j=1, \dots, NB} BD_{i,j} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (8.2)$$

La contrainte (8.3) montre que la somme des durées de déchargement des lots égale à la longueur de l'horizon de planification h_max .

$$\sum_{i=1, \dots, N} D_i = h_max \quad (8.3)$$

La contrainte (8.4) décrit la relation entre la durée de déchargement du lot i D_i et la variable binaire $y_{i,p}$: si aucun produit p n'est affecté au lot i (i.e. $\sum_{p=0, \dots, NP} y_{i,p} = 0$), alors la durée de déchargement D_i est nulle.

$$D_i \leq M * \sum_{p=0, \dots, NP} y_{i,p} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (8.4)$$

La contrainte (8.5) permet de fixer la date de début de déchargement du premier lot T_1 à 0. La contrainte (8.6) définit la relation entre les dates de début de déchargement de deux lots successifs T_i et T_{i+1} . La contrainte (8.7) montre la relation entre la durée de déchargement du lot i D_i et son volume Q_i .

$$T_1 = 0 \quad (8.5)$$

$$T_{i+1} = T_i + D_i \quad \forall i = 1, \dots, N - 1 \quad (8.6)$$

$$db_pp * D_i = Q_i \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (8.7)$$

4.4.2.9 Groupe de contraintes 9 : détermination de la demande totale des produits d'export

4.4.2.9.1 Détermination du volume des produits d'export

Les contraintes (9.1) et (9.2) permettent de déterminer le volume des lots qui comportent des produits d'export ($p = 2, \dots, NP$), noté $vpE_{i,p}$.

$$-M(1 - y_{i,p}) + Q_i \leq vpE_{i,p} \leq M(1 - y_{i,p}) + Q_i \quad \forall i = 1, \dots, N; p = 2, \dots, NP \quad (9.1)$$

$$-M * y_{i,p} \leq vpE_{i,p} \leq M * y_{i,p} \quad \forall i = 1, \dots, N; p = 2, \dots, NP \quad (9.2)$$

4.4.2.9.2 Vérification de la satisfaction de la demande des produits d'export

La contrainte (9.3) traduit la relation entre la demande de chaque produit d'export p dem_p ($p = 2, \dots, NP$), le volume total des lots contenant le produit d'export p ($\sum_{i=1 \dots N} vpE_{i,p}$), le volume total de rinçage reçu par les produits d'export de basse qualité $SvrB_p$ et le volume total de rinçage perdu par les produits de haute qualité $SvrH_p$.

$$\sum_{i=1 \dots N} vpE_{i,p} + Svrb_p + SvRH_p \geq dem_p \quad \forall p = 2, \dots, NP \quad (9.3)$$

4.4.2.9.3 Détermination du volume de rinçage

Pour calculer les deux volumes de rinçage $Svrb_p$ et $SvRH_p$, on introduit une variable entière auxiliaire : $cpBH_{k,i,j,p,q}$ qui indique si le changement du produit de basse qualité p au produit de haute qualité q a lieu pour le bac k , lors du déchargement d'un bloc j du lot i .

Elle est calculée en fonction des trois variables binaires $g2BpA_{k,i,j,p}$, $g2BpB_{k,i,j,q}$ et $mr_{p,q}$. La contrainte (9.4.1) décrit la relation entre les variables citées ci-dessus. Il faut rappeler que l'élément de la matrice de rinçage $mr_{p,q} = 1$ si le produit p est de basse qualité et le produit q est de haute qualité ; sinon, $mr_{p,q} = 0$.

$$cpBH_{k,i,j,p,q} = g2BpA_{k,i,j,p} + g2BpB_{k,i,j,q} + mr_{p,q} \quad \forall i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, NB; p = 2, \dots, NP; q = 2, \dots, NP; p \neq q \quad (9.4.1)$$

La variable $cpBH_{k,i,j,p,q}$ peut prendre quatre valeurs possibles, et l'opération de rinçage n'a lieu que si $cpBH_{k,i,j,p,q}$ égale à la dernière valeur :

- Si $cpBH_{k,i,j,p,q} = 0$: dans ce cas, aucun des deux produits p et q n'est stocké dans le bac k avant et après le déchargement du bloc j du lot i (i.e. $g2BpA_{k,i,j,p} = g2BpB_{k,i,j,q} = 0$). De plus, l'élément de la matrice de rinçage $mr_{p,q}$ est nul.
- Si $cpBH_{k,i,j,p,q} = 1$: dans ce cas, deux scénarios sont possibles : dans le premier scénario, le produit p est de haute qualité et le produit q est de basse qualité (dans ce cas $mr_{p,q} = 0$), toutefois, il n'y a pas eu de changement de produit dans le bac k (i.e. ($g2BpA_{k,i,j,p} = 1$ et $g2BpB_{k,i,j,q} = 0$) ou ($g2BpA_{k,i,j,p} = 0$ et $g2BpB_{k,i,j,q} = 1$)) ; dans le second scénario, le produit p est de basse qualité et le produit q est de haute qualité (dans ce cas $mr_{p,q} = 1$), cependant, aucun d'eux n'est stocké dans le bac k avant et après le déchargement du bloc j du lot i (i.e. $g2BpA_{k,i,j,p} = g2BpB_{k,i,j,q} = 0$).
- Si $cpBH_{k,i,j,p,q} = 2$: dans ce cas, deux scénarios peuvent avoir lieu : dans le premier scénario, le produit p est de haute qualité et le produit q est de basse qualité (dans ce cas $mr_{p,q} = 0$), de plus, il y a eu un changement de produit dans le cas k (i.e. $g2BpA_{k,i,j,p} = g2BpB_{k,i,j,q} = 1$) ; dans le second scénario, le produit p est de basse qualité et le produit q est de haute qualité (dans ce cas $mr_{p,q} = 1$), mais il n'y a pas eu de changement de produit dans le bac k (i.e. ($g2BpA_{k,i,j,p} = 1$ et $g2BpB_{k,i,j,q} = 0$) ou ($g2BpA_{k,i,j,p} = 0$ et $g2BpB_{k,i,j,q} = 1$)).
- Si $cpBH_{k,i,j,p,q} = 3$: dans ce cas, le produit p est de basse qualité et le produit q est de haute qualité (donc l'élément de la matrice rinçage $mr_{p,q} = 1$). De plus, un changement du produit p au produit q a eu lieu dans le bac k (i.e. $g2BpA_{k,i,j,p} = g2BpB_{k,i,j,q} = 1$). Par conséquent, il est nécessaire d'effectuer un rinçage du bac k , afin d'éviter la contamination du produit de haute qualité q .

De plus, on introduit une variable binaire auxiliaire : $vr_{k,i,j,p,q} = 1$ si un rinçage est nécessaire entre deux produits p et q dans le bac k lors du déchargement du bloc j du lot i . Les contraintes (9.4.2) et (9.4.3) traduisent la relation entre cette variable binaire et la variable entière $cpBH_{k,i,j,p,q}$. Si $g2BpA_{k,i,j,p} = 1$, $g2BpB_{k,i,j,q} = 1$ et $mr_{p,q} = 1$, sachant que les produits p et q sont différents (p est un produit de basse qualité et q de haute qualité), alors $cpBH_{k,i,j,p,q} = 3$, ce qui signifie qu'il y a eu un changement de produit qui nécessite un rinçage dans le bac k . Dans ce cas, on obtient $vr_{k,i,j,p,q} = 1$. Si $cpBH_{k,i,j,p,q} < 3$, alors $vr_{k,i,j,p,q} = 0$.

$$\begin{aligned}
 -M * (3 - cpBH_{k,i,j,p,q}) + 1 \leq vr_{k,i,j,p,q} & \quad \forall i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, NB; p \\
 & \quad \quad \quad \leq M * (3 - cpBH_{k,i,j,p,q}) + 1 & \quad \quad \quad = 2, \dots, NP; q \\
 & & & \quad \quad \quad = 2, \dots, NP; p \\
 & & & \quad \quad \quad \neq q
 \end{aligned} \tag{9.4.2}$$

$$\begin{aligned}
 vr_{k,i,j,p,q} \leq 1 - \varepsilon * (3 - cpBH_{k,i,j,p,q}) & \quad \forall i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, NB; p \\
 & \quad \quad \quad = 2, \dots, NP; q \\
 & \quad \quad \quad = 2, \dots, NP; p \\
 & \quad \quad \quad \neq q
 \end{aligned} \tag{9.4.3}$$

Les contraintes (9.4.4) et (9.4.5) déterminent les volumes de rinçage reçus $SvrB_p$ et perdus $SvrH_q$ en fonction de la variable binaire $vr_{k,i,j,p,q}$. En effet, le volume $SvrB_p$ représente le volume total de rinçage ajouté au volume total du produit de basse qualité p , et le volume $SvrH_q$ désigne le volume total de rinçage retiré du volume total du produit de haute qualité q durant l'horizon de planification.

$$SvrB_p = vc_p * \sum_{i=1..N, j=1..NB, k=3..5, q=2..NP \text{ et } p \neq q} vr_{k,i,j,p,q} \quad \forall p = 2, \dots, NP \quad (9.4.4)$$

$$SvrH_q = -vc_q * \sum_{i=1..N, j=1..NB, k=3..5, p=2..NP \text{ et } p \neq q} vr_{k,i,j,p,q} \quad \forall q = 2, \dots, NP \quad (9.4.5)$$

4.4.2.10 Groupe de contraintes 10 : détermination du volume total des produits

Les contraintes (10.1) à (10.3) déterminent le volume du produit vp_i dans le cas où il ne s'agit pas d'un lot qui comporte de l'eau ($y_{i,0} = 0$).

$$-M(1 - y_{i,0}) \leq vp_i \leq M(1 - y_{i,0}) \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (10.1)$$

$$-M y_{i,0} + Q_i \leq vp_i \leq M y_{i,0} + Q_i \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (10.2)$$

$$vp_i \leq Q_i \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (10.3)$$

La contrainte (10.4) calcule le volume total qui regroupe le produit local K09L et les produits d'export, noté vp_total . La contrainte (10.5) détermine le volume total d'eau v_eau envoyé durant l'horizon de planification h_max à partir du volume vp_total . Ce volume doit être positif d'après la contrainte (10.6).

$$\sum_{i=1..N} vp_i = vp_total \quad (10.4)$$

$$v_eau + vp_total = db_pp * h_max \quad (10.5)$$

$$v_eau \geq 0 \quad (10.6)$$

4.4.3 Fonction objectif :

Le modèle linéaire vise à maximiser le volume total des produits (K09L et produits d'export) envoyés par le pipeline principal durant l'horizon de planification, désigné par vp_total , en utilisant le nombre minimum possible de blocs des lots, indiqué par nb_bloc . Cette minimisation est réalisée en ajoutant une pénalité ρ . Par ailleurs, une alternative possible serait de considérer la maximisation du volume des produits d'export uniquement au lieu de

l'ensemble des produits de phosphate. Ainsi, la fonction objectif retenue est présentée comme suit :

$$(max) \quad vp_total - \rho * nb_bloc$$

4.5 Expérimentations numériques

Dans cette section, on présente l'étude d'analyse menée sur le réseau de pipelines OCP, les instances de test créées ainsi que les résultats du modèle linéaire. De ce fait, la présentation et l'analyse de la structure du réseau de pipelines OCP sont détaillées aux sous-sections 4.5.1 et 4.5.2 respectivement. Ensuite, un exemple d'ordonnancement du réseau de pipelines est présenté à la sous-section 4.5.3. Le processus de génération des instances et les résultats obtenus sont détaillés à la sous-section 4.5.4. Enfin, une analyse de la sensibilité du modèle linéaire est présentée à la sous-section 4.5.5.

4.5.1 Présentation de la structure du réseau de pipelines OCP

La Figure 4.2 illustre la structure du réseau de pipeline de l'OCP. Celle-ci se compose d'une source (Station de Tête) et de trois destinations (Station Terminale, Clients locaux et Downstream). Ces différents nœuds du réseau sont reliés entre eux par quatre pipelines : un pipeline principal d'une longueur de 187 km et trois pipelines secondaires. Le débit du pipeline principal et des pipelines secondaires 2 et 3 sont fixés respectivement à $db_pp = 4000 \text{ m}^3/h$, $db_el = 1000 \text{ m}^3/h$, et $db_ds = 600 \text{ m}^3/h$, pour toutes les instances. Cependant, le débit db_ci du pipeline secondaire 1, qui relie entre la Station Terminale et les clients locaux, varie d'une instance à une autre, avec une moyenne de $3000 \text{ m}^3/h$.

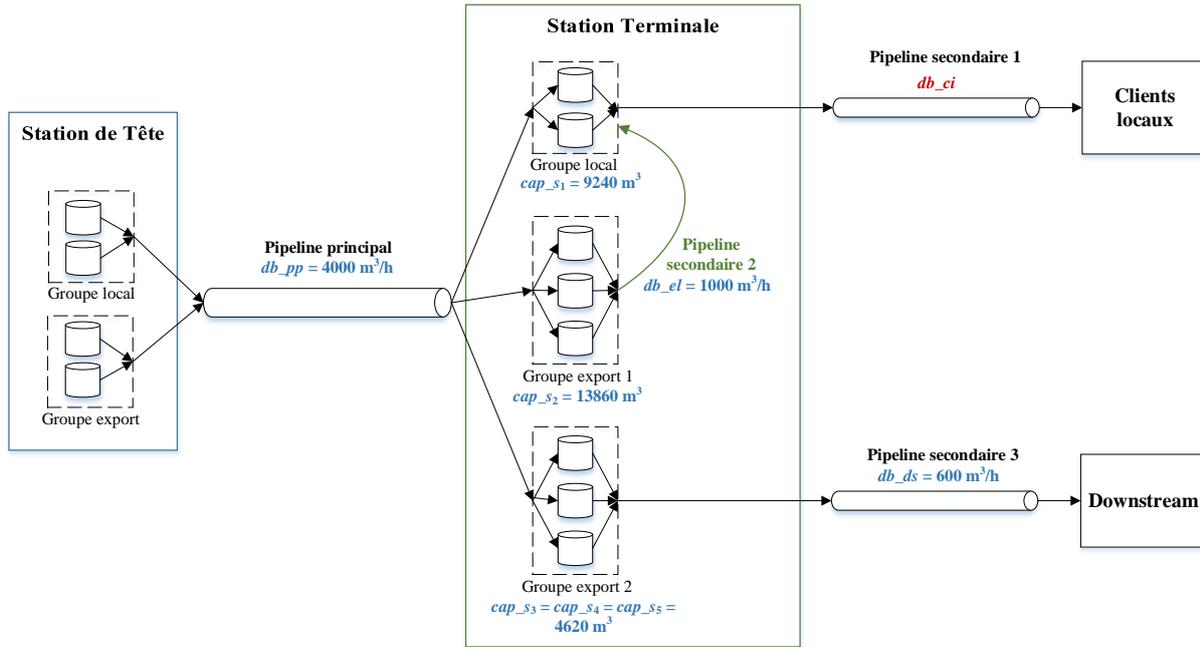


Figure 4.2 : Structure du réseau de pipelines OCP

De plus, les bacs de stockage disponibles à la Station Terminale sont regroupés en trois groupes, où chaque bac possède une capacité totale de 6000 m^3 . Cependant, on ne peut pas utiliser la totalité de cette capacité. Les taux de remplissage minimum et maximum de chaque bac sont imposés, qui sont fixés à 13% et 90% respectivement. De ce fait, la capacité utile d’un bac de stockage est : $cap_u = 6000 * (0.9 - 0.13) = 4620 \text{ m}^3$.

Ainsi, comme montre sur la Figure 4.2, le groupe local et le groupe export 1 sont modélisés comme deux unités de stockage avec une capacité respective de $cap_{s_1} = 4620 * 2 = 9240 \text{ m}^3$ et de $cap_{s_2} = 4620 * 3 = 13860 \text{ m}^3$. Par contre, les 3 bacs du groupe export 3 sont modélisés de deux façons différentes en fonction du nombre de produits d’export : une unité de stockage avec une capacité de $cap_{s_3} = 4620 * 3 = 13860 \text{ m}^3$, dans le cas où il n’existe qu’un seul produit d’export ; la seconde modélisation est utilisée lorsqu’il y au moins deux produits d’export, chaque bac est modélisé comme une unité de stockage avec une capacité utile respective de $cap_{s_3} = cap_{s_4} = cap_{s_5} = 4620 \text{ m}^3$.

Lors de la planification, on cherche à créer une séquence de lot à transporter durant l’horizon temporel. Un lot de produit peut être composé de plusieurs blocs en fonction des unités de stockage utilisées. Chaque lot possède un volume qui doit être compris entre les bornes inférieure et supérieure : la borne inférieure qui fixée à $Vmin_p = 4000 \text{ m}^3$ pour tous les lots comportant les produits de phosphate (i.e. $p = 1, \dots, NP$), et à $Vmin_0 = 1000 \text{ m}^3$ pour les lots qui contiennent de l’eau (produit séparateur) ; la borne supérieure $Vmax_p$ est déterminée en fonction en plusieurs paramètres : le débit du pipeline principal et la capacité utile des groupes de bacs. Cette borne maximale dépend également d’autres paramètres selon le produit contenu dans chaque lot : le débit des clients locaux pour les lots comportant le produit local et le débit

du downstream pour les lots qui comportent les produits d'export. La détermination des bornes supérieures sont détaillées à la section suivante.

4.5.2 Analyse de la structure du réseau de pipelines OCP

Dans cette sous-section, une analyse de la structure du réseau de pipelines est présentée. Cette analyse permet, d'une part, de déterminer le volume maximum d'un lot comportant soit le produit local, selon la demande des clients locaux (modélisée par le débit db_{ci}), soit un produit d'export (voir 4.5.2.1) ; d'autre part, elle permet d'étudier l'évolution du niveau des stocks pour les trois groupes de stockage à la Station Terminale (voir 4.5.2.2).

Pour ce faire, les données d'entrée sur lesquelles se base cette analyse sont représentées par le Tableau 4.3 et le Tableau 4.4. La capacité et le stock initial des groupes de stockage à la Station Terminale sont présentés dans le Tableau 4.3, et les débits des différents pipelines sont donnés dans le Tableau 4.4. Notons que les 3 bacs du groupe export 2 sont regroupés dans la détermination du volume maximum des lots.

Tableau 4.3 : Capacité et stock initial des groupes de bacs

| Groupe de bacs | Capacité utile m^3 | Stock initial m^3 |
|-----------------|----------------------|---------------------|
| Groupe local | 9240 | 0 |
| Groupe export 1 | 13860 | 0 |
| Groupe export 2 | 13860 | 0 |

Tableau 4.4 : Débit des pipelines

| | |
|---|------|
| Débit du pipeline principal db_{pp} (m^3/h) | 4000 |
| Débit de transfert vers le groupe local db_{el} (m^3/h) | 1000 |
| Débit du Downstream db_{ds} (m^3/h) | 600 |
| Débit des clients internes db_{ci} (m^3/h) | 3000 |

4.5.2.1 Détermination du volume maximum d'un lot

Le volume maximum d'un lot $Vmax_p$ est un paramètre qui varie en fonction du produit contenu dans le lot et de la configuration des pipelines secondaires concernés. Pour le produit local, deux groupes de stockage sont concernés avec un pipeline secondaire de transfert entre eux. Pour un produit d'export, un seul groupe de stockage est utilisé. Les volumes maximum d'un lot comportant le produit local et les produits d'export sont calculés différemment.

4.5.2.1.1 Détermination du volume maximum d'un lot comportant le produit local

Pour le produit local, le volume maximum d'un lot est déterminé de façon à ce qu'il puisse remplir le groupe local et le groupe export 1 au maximum possible. De plus, il faut prendre en considération le pipeline de transfert du groupe export 1 vers le groupe local avec un débit $db_{el} = 1000m^3/h$. Pour cela, le lot est divisé en plusieurs blocs qui sont déchargés en manière alternative dans le groupe local ou dans le groupe export 1.

Les étapes de calcul du volume maximum d'un lot contenant le produit local sont illustrées par le Tableau 4.5, avec un débit des clients locaux $db_{ci} = 3000m^3/h$.

Le Tableau 4.5 se compose de deux sous-tableaux :

- Le premier sous-tableau permet de déterminer le volume déchargé de chaque bloc du lot dans un groupe de stockage (le groupe local ou le groupe export 1) ; il comporte cinq colonnes qui désignent le nombre maximum de blocs du lot ;
- Le second sous-tableau est utilisé pour déterminer le volume vidé dans l'autre groupe de stockage durant le déchargement d'un bloc, afin de mettre à jour son niveau de stock pour le déchargement du bloc suivant.

Tableau 4.5 : Calcul du volume maximum d'un lot comportant le produit local K09L

| Numéro de bloc | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| Groupe de stockage | Groupe Local | Groupe Export 1 | Groupe Local | Groupe Export 1 | Groupe Local |
| Débit d'entrée (m^3/h) | 4000.00 | 4000.00 | 5000.00 | 4000.00 | 5000.00 |
| Débit de sortie (m^3/h) | 3000.00 | 1000.00 | 3000.00 | 1000.00 | 3000.00 |
| Débit de remplissage (m^3/h) | 1000.00 | 3000.00 | 2000.00 | 3000.00 | 2000.00 |
| Capacité résiduelle (m^3) | 9240.00 | 13860.00 | 9240.00 | 4620.00 | 3080.00 |
| Stock initial (m^3) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 9240.00 | 6160.00 |
| Durée de remplissage (h) | 9.24 | 4.62 | 4.62 | 1.54 | 1.54 |
| Stock final (m^3) | 9240.00 | 13860.00 | 9240.00 | 13860.00 | 9240.00 |
| Volume déchargé (m^3) | 36960.00 | 18480.00 | 18480.00 | 6160.00 | 6160.00 |

| Groupe de stockage | Groupe export 1 | Groupe local | Groupe export 1 | Groupe local | Groupe export 1 |
|------------------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| Débit d'entrée (m^3/h) | 0.00 | 1000.00 | 0.00 | 1000.00 | 0.00 |
| Débit de sortie (m^3/h) | 0.00 | 3000.00 | 1000.00 | 3000.00 | 1000.00 |
| Débit de vidange (m^3/h) | 0.00 | 2000.00 | 1000.00 | 2000.00 | 1000.00 |
| Stock initial (m^3) | 0.00 | 9240.00 | 13860.00 | 9240.00 | 13860 |
| Volume libéré (m^3) | 0.00 | 9240.00 | 4620.00 | 3080.00 | 1540.00 |
| Durée de vidange (h) | 0.00 | 4.62 | 4.62 | 1.54 | 1.54 |
| Stock final (m^3) | 0.00 | 0.00 | 9240.00 | 6160.00 | 12320.00 |

Il est à noter que les deux sous-tableaux comportent le même nombre de colonnes : les opérations de remplissage et de vidange peuvent s'effectuer simultanément. Par exemple, le

déchargement du bloc 2 du lot vers le groupe export 1 (colonne 3 du premier sous-tableau) et la vidange du groupe local (colonne 3 du deuxième sous-tableau) se réalisent en même temps.

Dans ce qui suit, nous considérons les colonnes 2 et 3 du premier sous-tableau pour illustrer les étapes de calcul du volume maximum d'un lot. Nous considérons que les deux groupes de stockage sont vides à l'état initial. La colonne 2 du premier sous-tableau concerne le déchargement du bloc 1 dans le groupe local, et comporte des informations suivantes :

- Le numéro du bloc à décharger (ligne 1) ;
- Le groupe de stockage où sera déchargé le volume du bloc (ligne 2) ;
- Le débit d'entrée dans le groupe local, qui est égal ici au débit du pipeline principal $db_{pp} = 4000m^3/h$ (ligne 3) ;
- Le débit de sortie qui est le débit du pipeline secondaire vers des clients locaux $db_{ci} = 3000m^3/h$ (ligne 4) ;
- La différence entre le débit d'entrée et le débit de sortie donne un débit de remplissage de $4000 - 3000 = 1000m^3/h$ (ligne 5) au groupe local ;
- La capacité résiduelle est égale à $9240 m^3$ puisque le groupe local est initialement vide (ligne 6) ;
- Le stock initial est nul pour le cas du groupe local (ligne 7) ;
- La durée de remplissage est déterminée selon la capacité résiduelle et le débit de remplissage. La durée est de $9240/1000 = 9.24h$ (ligne 8) ;
- Le stock final est la somme du stock initial et du volume de remplissage. Ce dernier est égal à la multiplication entre le débit de remplissage et la durée de remplissage. Le stock final est de $0 + 1000 * 9.24 m^3$ (ligne 9) ;
- Le volume déchargé représente le volume du bloc à décharger dans le groupe local. Il est déterminé en multipliant la durée de remplissage par le débit du pipeline principal, ce qui donne $9.24 * 4000 = 36960m^3$ (ligne 10).

Après le remplissage total du groupe local (colonne 2 du premier tableau), le groupe export 1 doit être rempli à son tour (colonne 3 du premier sous-tableau). Au passage de la colonne 2 à la colonne 3, la date courante est de $9.24h$. Le volume du bloc à décharger au niveau du groupe export 1 est déterminé dans la colonne 3 en suivant les mêmes étapes que dans la colonne 2. Au final, le volume maximum obtenu du bloc 2 est de $18480m^3$, avec une durée de remplissage de $4.62h$.

Pendant que le groupe export 1 se remplit (colonne 3 du premier sous-tableau), le groupe local, qui était auparavant totalement rempli, est en train de se vider (colonne 3 du second sous-tableau). Il est nécessaire de calculer le volume libéré au niveau de groupe local, pendant cette période, afin d'éviter le cas d'une rupture de stock. La colonne 3 du second sous-tableau détaille le calcul du volume libéré, et comporte les informations suivantes :

- La ligne 1 indique le groupe de stockage qui se vide ;
- Le débit d'entrée durant la vidange représente le débit de transfert depuis le groupe export 1 au groupe local, qui est de $1000m^3/h$ (ligne 2) ;
- La ligne 3 donne le débit de sortie du groupe local qui est de $3000m^3/h$ (le débit de consommation des clients internes) ;
- La différence entre le débit de sortie et d'entrée donne le débit de vidange du groupe local, qui est de $3000 - 1000 = 2000m^3/h$ (ligne 4) ;
- Le stock initial avant l'opération de vidange est donné à la ligne 5 ;
- Le volume libéré (ligne 6) est le minimum entre le stock initial et la durée de remplissage du groupe export 1 multipliée par le débit de vidange. Dans le cas du groupe local, la rupture de stock n'est pas autorisée ;
- La durée de vidange (ligne 7) est déterminée en divisant le volume libéré par le débit de vidange. Cette durée est comparée à la durée de remplissage du groupe export 1 (ligne 8 du premier sous-tableau) : si la durée de remplissage est plus grande que celle de vidange, la durée de remplissage sera remplacée par celle de vidange pour éviter le risque de rupture du groupe local. Le volume du bloc sera également modifié dans ce cas.

Le volume libéré dans groupe local, déterminé à la colonne 3 du second sous-tableau, est de $9240m^3$. Nous remarquons que la durée de vidange du groupe local (ligne 7 du second sous-tableau) et la durée de remplissage du groupe export 1 (ligne 8 du premier sous-tableau) sont identiques. De ce fait, le volume maximum du bloc 2 à décharger dans le groupe export 1 reste le même.

Les étapes de calcul ci-dessus sont répétées pour déterminer le volume maximum des blocs et le volume libéré dans les deux groupes de manière alternative (détaillés dans les colonnes suivantes). Le calcul s'arrête si la durée de remplissage du groupe de stockage est inférieure à une heure. A partir du Tableau 4.5, nous remarquons que le dernier volume libéré appartient au groupe export 1, et vaut $1540m^3$. Par conséquent, la durée de remplissage du groupe export 1 à la prochaine étape sera de $1540/(4000 - 1000) = 0.51h$, qui est inférieure à une heure. Ainsi, le lot contenant le produit local peut avoir un nombre maximum de 5 blocs, et contient un volume maximum de $86240m^3$ (la somme des volumes des 5 blocs), avec une durée de déchargement maximale de 21.56h. Il a été convenu, en concertation avec l'équipe de planification de l'OCP, de fixer le volume maximum des lots comportant le produit local à $80000m^3$.

La Figure 4.3 et Figure 4.4 représentent respectivement l'évolution du stock du groupe local et du groupe export 1, lors du déchargement des blocs du lot ayant le volume maximum. Les deux figures illustrent le résultat des calculs effectués dans le Tableau 4.5, et montrent les opérations de remplissage et de vidange au niveau des deux groupes de stockage : chaque

opération de remplissage d'un groupe correspond au déchargement d'un bloc du lot. On remarque que trois blocs sont déchargés dans le groupe local (Figure 4.3) et deux blocs sont déchargés dans le groupe export 1 (Figure 4.4), et ce de manière alternative.

Par ailleurs, l'opération de remplissage d'un groupe et l'opération de vidange de l'autre sont réalisées de façon simultanée. Par exemple, le groupe local se remplit entre les deux dates de 13.86h à 18.48h ; pendant la même période, le groupe export 1 est en train de se vider.

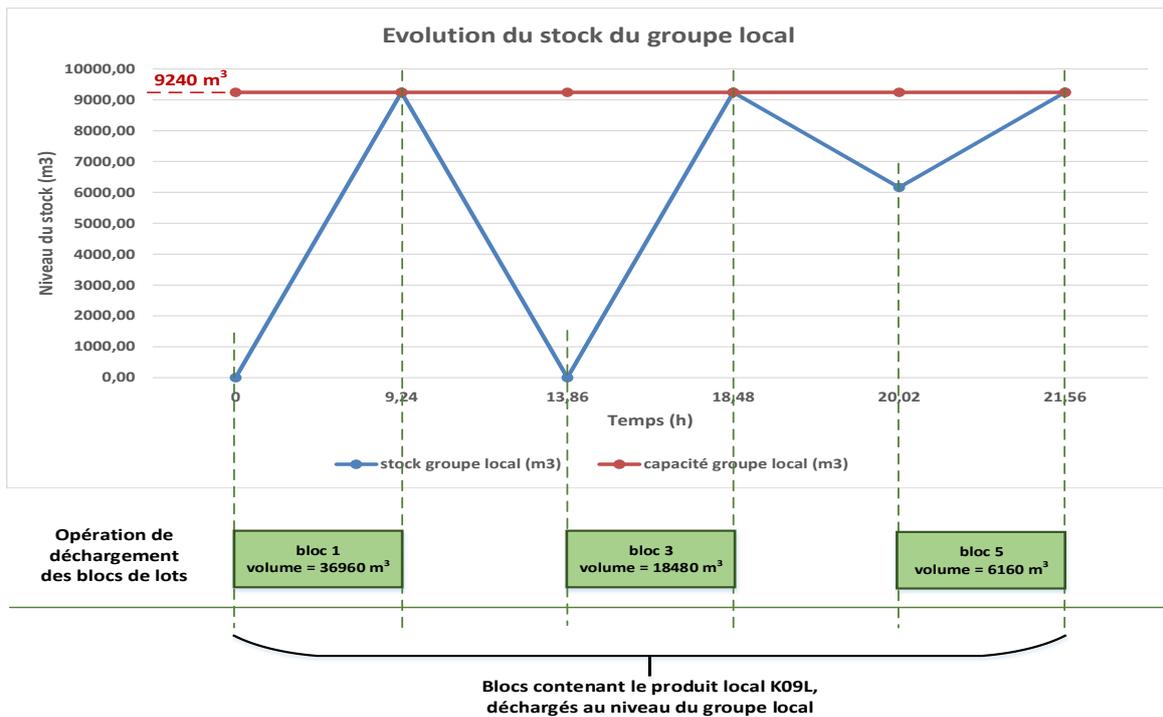


Figure 4.3 : Evolution du stock du groupe local lors du déchargement d'un lot ayant le volume maximum

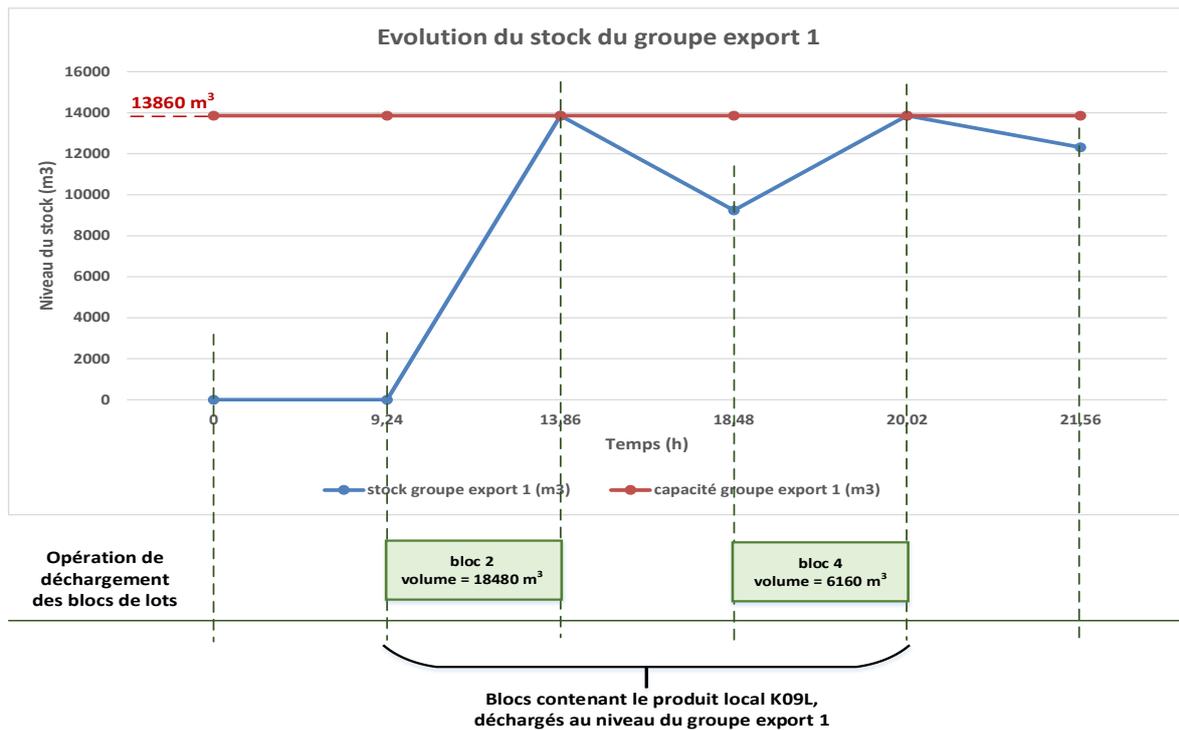


Figure 4.4 : Evolution du stock du groupe export 1 lors du déchargement d'un lot ayant le volume maximum

4.5.2.1.2 Détermination du volume maximum d'un lot comportant un produit d'export

Le volume maximum d'un lot contenant un produit d'export est déterminé en regroupant les bacs du groupe export 2, de sorte qu'il puisse remplir ce groupe au maximum possible. En supposant que le groupe export 2 est initialement vide, le Tableau 4.6 fournit les informations permettant de calculer le volume maximum :

- Le débit d'entrée dans le groupe export 2 est égal au débit du pipeline principal $db_{pp} = 4000m^3/h$ (ligne 2) ;
- Le débit de sortie correspond au débit du pipeline secondaire reliant la Station Terminale à l'unité du Downstream (ligne 3) ;
- La différence entre les deux débits ci-dessus donne le débit de remplissage qui est égal à $3400m^3/h$ (ligne 4) ;
- La capacité résiduelle représente le volume libre du groupe export 2. Elle est égale à la capacité du groupe puisque celui-ci est initialement vide (ligne 5) ;
- La durée de remplissage (ligne 6) est calculée en divisant la capacité résiduelle par le débit de remplissage ;
- Le volume total déchargé (ligne 7) donne le volume du lot. Il est déterminé en multipliant la durée de remplissage calculée à la ligne 6 par le débit de remplissage de la ligne 2 ;

Le volume maximum obtenu d'un lot comportant un produit d'export est de $16305.88m^3$, que l'on arrondi à $16300m^3$ pour toutes les instances utilisées dans ce chapitre.

Tableau 4.6 : Calcul du volume maximum d'un lot comportant un produit d'export

| | Groupe export 2 |
|----------------------------------|-----------------|
| Débit d'entrée (m^3/h) | 4000.00 |
| Débit de sortie (m^3/h) | 600.00 |
| Débit de remplissage (m^3/h) | 3400.00 |
| Capacité résiduelle (m^3) | 13860.00 |
| Durée de remplissage h | 4.08 |
| Volume déchargé (m^3) | 16305.88 |

La Figure 4.5 illustre la variation du niveau de stock pour le groupe export 2 lors du déchargement d'un lot contenant un produit d'export et ayant le volume maximum. Nous remarquons bien que les opérations de remplissage et de vidange dans le groupe export 2 s'effectuent de façon simultanée durant la période de déchargement du lot. C'est la raison pour laquelle le volume maximum d'un lot est supérieur à la capacité de stockage.

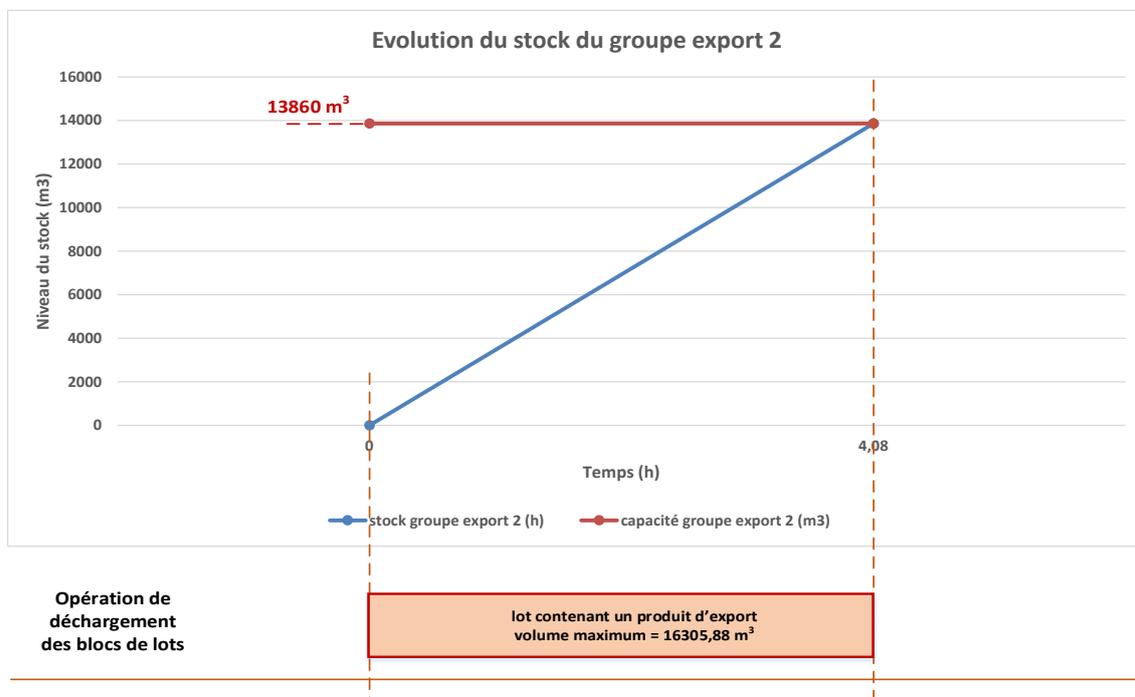


Figure 4.5 : Evolution du groupe export 2 lors du déchargement du lot ayant le volume maximum

4.5.2.2 Analyse de l'évolution des stocks des groupes de bacs à la Station Terminale

Dans cette partie, une première étude est réalisée pour analyser la variation de stock des groupes, à partir d'un exemple d'ordonnancement des lots sur un horizon de planification de 4 jours, en considérant 3 produits : l'eau ($p = 0$), le produit local ($p = 1$) et un produit d'export ($p = 2$). L'état initial des stocks est figuré dans Tableau 4.7, où le groupe local et le groupe export 1 sont vides, et le groupe export 2 est initialement rempli. Les informations portant sur lots sont fournies par le Tableau 4.8.

Tableau 4.7 : Capacité et stock initial des groupes de bacs

| Groupe de bacs | Capacité utile m^3 | Stock initial m^3 |
|-----------------------|--|---------------------------------------|
| Groupe local | 9240 | 0 |
| Groupe export 1 | 13860 | 0 |
| Groupe export 2 | 13860 | 13860 |

Tableau 4.8 : Informations sur les lots planifiés sur l'horizon de planification

| Numéro du lot | Numéro du produit | Volume du lot m^3 | Nombre de blocs |
|---------------|-------------------|------------------------|-----------------|
| 1 | 1 | 80000.00 | 4 |
| 2 | 0 | 1000.00 | 1 |
| 3 | 2 | 10400.00 | 1 |
| 4 | 0 | 1000.00 | 1 |
| 5 | 1 | 39226.67 | 3 |
| 6 | 0 | 1000.00 | 1 |
| 7 | 2 | 10992.94 | 1 |
| 8 | 0 | 6487.06 | 1 |
| 9 | 1 | 60554.07 | 5 |
| 10 | 0 | 1000.00 | 1 |
| 11 | 2 | 12007.26 | 1 |
| 12 | 0 | 5472.74 | 1 |
| 13 | 1 | 56008.23 | 5 |
| 14 | 0 | 1000.00 | 1 |
| 15 | 2 | 11026.05 | 1 |
| 16 | 0 | 6453.95 | 1 |
| 17 | 1 | 55503.14 | 5 |
| 18 | 0 | 1000.00 | 1 |
| 19 | 2 | 11110.07 | 1 |
| 20 | 0 | 6369.93 | 1 |

L'évolution du stock des groupes local et export 1, ainsi que celle du groupe export 2, en fonction du temps, est illustrée par la Figure 4.6 et la Figure 4.7 respectivement. On retrouve également, sur ces deux figures, les dates de début et de fin de déchargement des lots et de leurs blocs. Le déchargement des lots comportant le produit local s'effectue en plusieurs blocs, en alternant entre le groupe local (blocs en vert foncé) et le groupe export 1 (blocs en vert clair). De plus, nous observons, par rapport à l'évolution des groupes de bacs, qu'il existe deux états :

- Un état **transitoire** de la date « 0h » à la date « 37.53h » : durant cette période, les lots déchargés sont les suivants : deux lots comportant le produit local est ayant des volumes très différents ($80000m^3$ pour le premier et $39226.67m^3$ pour le second) ; deux lots contenant le produit d'export (en rouge clair) ; et quatre lots d'eau (en bleu) séparant les produits de phosphate.

- Un état **constant** de la date « 37.53h » jusqu'à la fin de l'horizon temporel à la date « 94.40h » : pendant cette période, on remarque que les courbes d'évolution du stock pour les trois groupes ont l'allure d'une courbe sinusoïdale. En effet, les courbes représentent des ondulations qui se répètent, et qui coïncident avec le déchargement de lots ayant des volumes assez similaires. Par exemple, pour les trois lots déchargés comportant le produit local, leurs volumes sont comme suit : $60554.07m^3$ pour le premier, $56008.23m^3$ pour le second et $55503.14m^3$ pour le troisième.

Il faut noter que cette évolution des stocks obtenue concerne uniquement les scénarios avec trois produits (donc un produit d'export). Une telle caractéristique pourra changer pour les instances avec plusieurs produits d'export.

Par ailleurs, une seconde analyse est menée, en variant le débit des clients internes db_{ci} afin d'évaluer son impact sur la variation du stock des groupes de bacs. Effectivement, deux valeurs du débit db_{ci} ont été choisies : un débit élevé de $3500m^3/h$ et un débit faible de $2500m^3/h$. Nous calculons le volume à décharger d'un lot comportant le produit local, suivi d'un lot contenant un produit d'export, les deux étant séparés par un lot d'eau. La Figure 4.8 et la Figure 4.9 représentent l'évolution du stock des trois groupes de bacs, pour le débit de $3500m^3/h$ et de $2500m^3/h$ respectivement, durant le déchargement de la séquence de lots suivante : un lot contenant le produit local, un lot d'eau, un lot comportant un produit d'export, un lot d'eau.

En comparant les deux figures, on remarque que le remplissage du groupe local et du groupe export 1 nécessite plus de temps avec un débit des clients internes de $3500m^3/h$ (20 heures) qu'avec un débit de $2500m^3/h$ (15.03 heures). Ceci est lié au volume du lot comportant le produit local déchargé, qui est impacté par le débit des clients internes : le volume maximum du lot calculé initialement pour le cas du débit de $3500m^3/h$ est de $135246.22m^3$, mais il a été réduit à $80000m^3$ vu qu'il dépasse cette valeur ; cependant, le volume maximum du lot pour le débit de $2500m^3/h$ atteint uniquement $60121.60m^3$, en raison de la faible consommation des clients internes.

Par ailleurs, à partir de la Figure 4.8, on constate qu'avec un débit élevé des clients internes, le groupe local et le groupe export 1 ne peuvent pas être rempli totalement, atteignant respectivement un niveau de $5440m^3$ et de $4560m^3$ à la date « 20h ». En conséquence, la durée de vidange du groupe local est courte, et qui est d'une valeur de 2.18 heures. Ceci entraîne à son tour l'envoi un volume faible du lot contenant le produit d'export, avec uniquement $6704m^3$, qui ne permet pas de remplir tous les bacs du groupe export 2.

En revanche, dans le cas d'un faible débit des clients internes (Figure 4.9), on constate qu'après le déchargement du lot contenant le produit local à la date « 15.03h », le groupe local et le groupe export 1 atteignent presque leur capacité, avec $9240m^3$ pour le premier et $13305.60m^3$ pour le second. De plus, la durée de vidange du groupe local est plus longue en

comparaison avec le cas ayant un débit de $3500m^3/h$: cette durée de vidange est de 6.16 heures. Par conséquent, le volume calculé du lot comportant le produit d'export est de $10609.69m^3$, et peut remplir le groupe export 2 au maximum. Cependant, la durée de remplissage de ce groupe correspond uniquement à 2.65 heures. Ceci signifie qu'une grande partie de la durée de vidange du groupe est dédiée au déchargement des deux lots contenant de l'eau : cette durée est de $6.16 - 2.65 = 3.51h$, et le volume total correspondant d'eau est de $3.51 * 4000 = 14030.31m^3$. Si le groupe export 2 est initialement vide, alors sa durée de remplissage sera plus grande.

En somme, les résultats de la seconde étude montrent ce qui suit :

- Pour le cas d'un débit élevé des clients internes (de l'ordre de $3500m^3/h$ et plus) : le volume calculé des lots qui comporte le produit local atteint la valeur maximale fixée à $80000m^3$, mais permet de remplir uniquement la moitié des groupes local et export 1. De ce fait, on obtient des fenêtres de temps courtes pour envoyer les produits d'export.
- Pour le cas d'un débit faible des clients internes (moins de $2500m^3/h$) : même si tous les groupes de bacs peuvent être remplis quasi totalement, une quantité plus importante d'eau doit être envoyée entre les produits de phosphate au risque de dépasser la capacité de stockage.

Ces remarques permettent de conclure par rapport au débit des clients internes à retenir : toute valeur comprise entre une valeur maximale de $3500m^3/h$ et une valeur minimale de $2500m^3/h$ peut être prise en compte dans la création des instances, afin de tester la performance du modèle proposé.

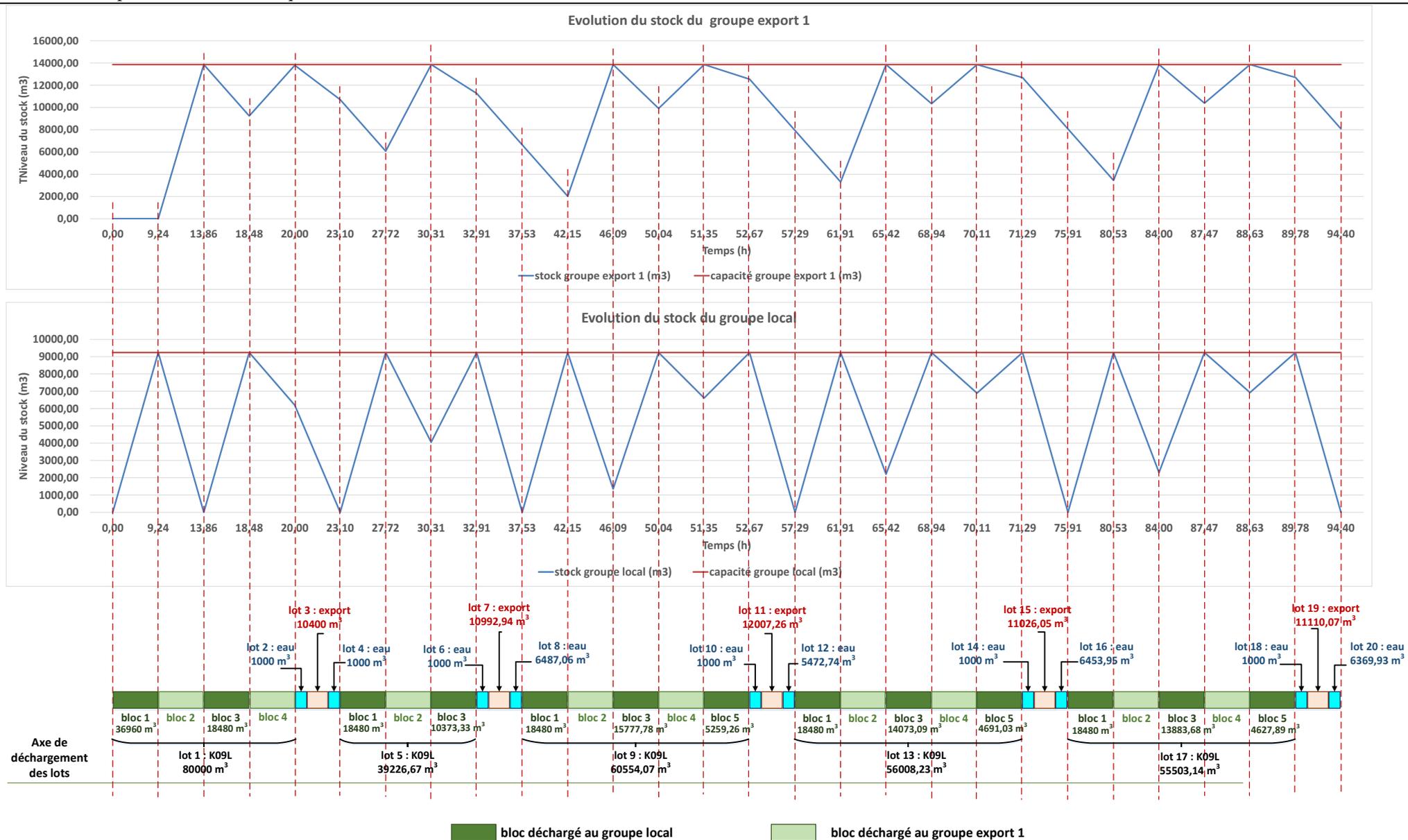


Figure 4.6 : Evolution du stock du groupe local et du groupe export 1 lors du déchargement des blocs de lots sur un horizon d'environ 4 jours

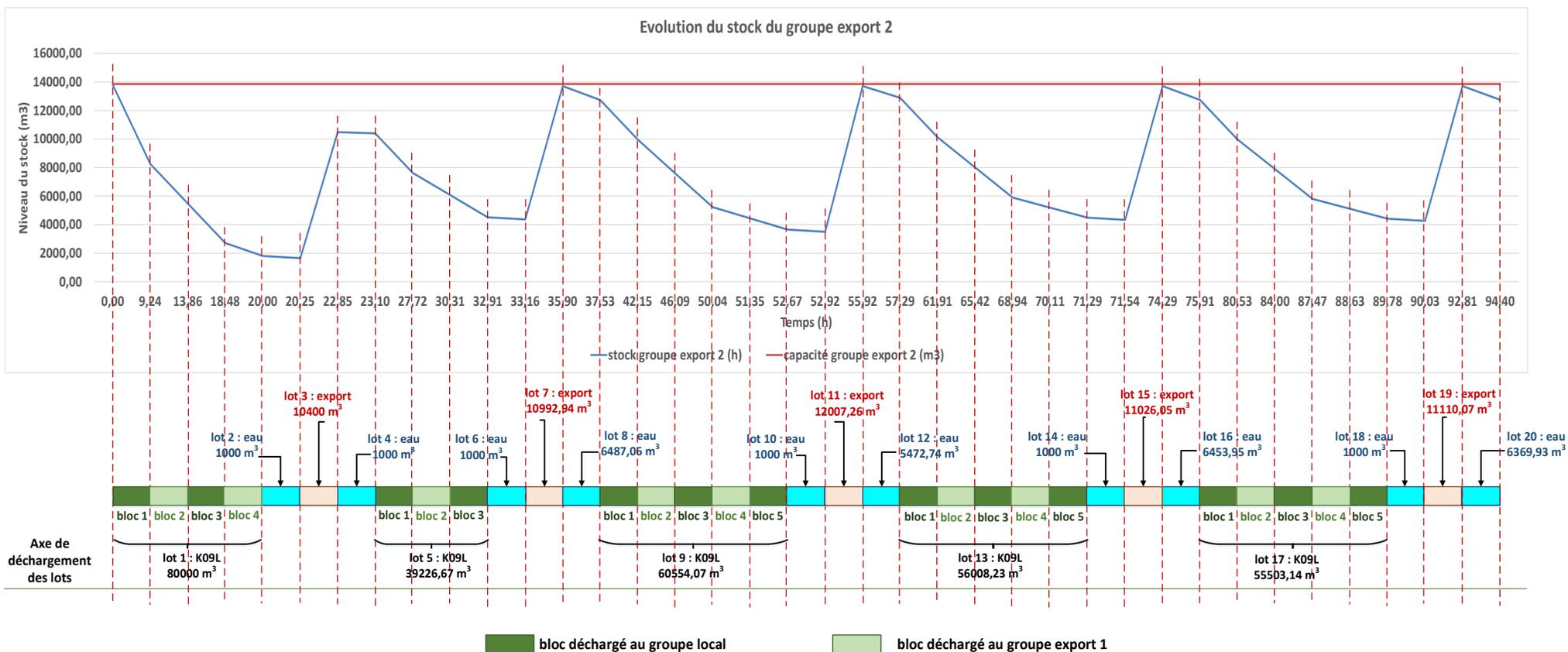


Figure 4.7 : Evolution du stock du groupe export 2 lors du déchargement des blocs de lots sur un horizon d'environ 4 jours

Section 4.5 - Expérimentations numériques

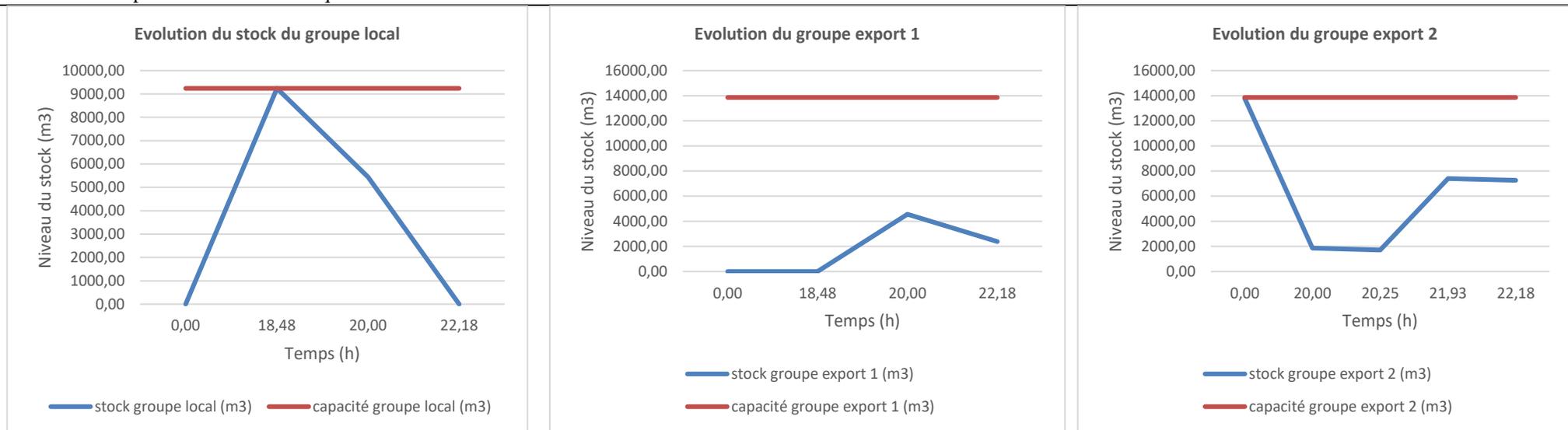


Figure 4.8 : Evolution du stock des trois groupes à la Station Terminale avec un débit des clients internes de $3500m^3/h$

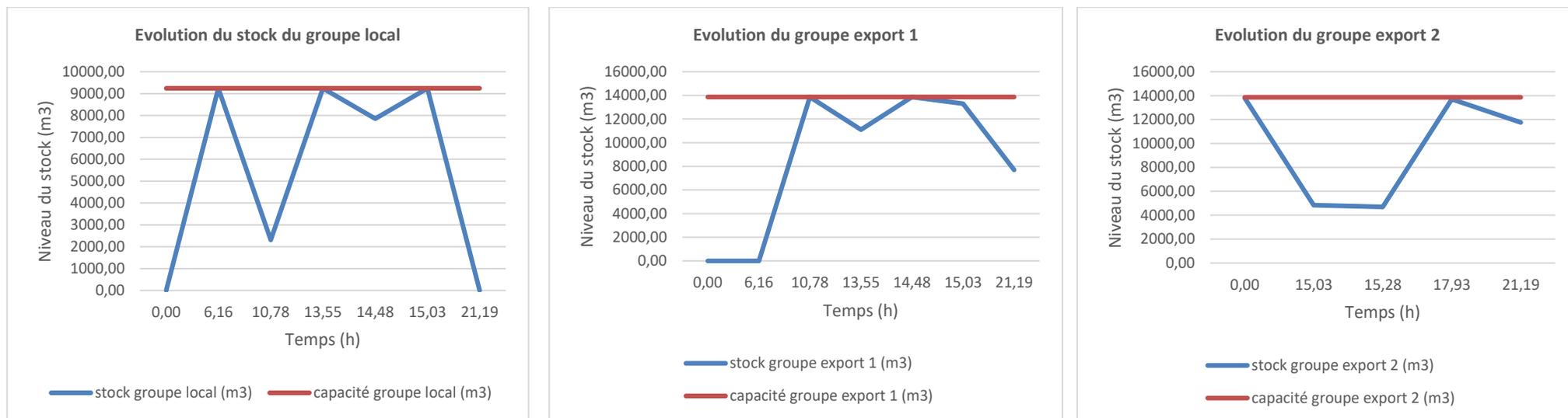


Figure 4.9 : Evolution du stock des trois groupes à la Station Terminale avec un débit des clients internes de $2500m^3/h$

4.5.3 Présentation d'un exemple d'instance

Cette sous-section se focalise sur la présentation d'un exemple d'ordonnancement du réseau de pipelines OCP, en se basant sur une instance inspirée d'un cas réel. Il s'agit d'une instance sur un horizon de 2 jours, avec 3 produits : l'eau ($p = 0$), le produit local ($p = 1$) et un produit d'export ($p = 2$).

Le Tableau 4.9 au Tableau 4.12 présentent les différents paramètres considéré dans cette instance : le Tableau 4.9 détaillent les données concernant les produits, à savoir le volume minimum et maximum selon le produit, ainsi que la demande sur 2 jours pour chaque produit, à l'exception de l'eau ; le Tableau 4.10 fournit la capacité, le stock initial et le produit contenu initialement dans chaque groupe de stockage ; le Tableau 4.11 illustre le débit des différents pipelines ; enfin, le Tableau 4.12 présente la matrice de compatibilité entre les produits. Cette matrice décrit les séquences possibles et interdites entre les lots, avec une valeur « 1 » si la séquence entre deux produits contenus dans deux lots successif est autorisée, et une valeur « 0 » sinon. On remarque que seule l'eau est compatible avec les produits de phosphate, afin de pouvoir séparer entre les lots qui les comportent.

Tableau 4.9 : Données d'entrée relatives aux produits

| Numéro du produit | Désignation du produit | Volume minimum (m^3) | Volume maximum (m^3) | Demande totale (m^3) |
|-------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0 | eau | 1000 | 20000 | - |
| 1 | produit local K09L | 4000 | 80000 | 158400 |
| 2 | produit d'export | 4000 | 16300 | 16985 |

Tableau 4.10 : Données concernant les groupes de stockage

| Groupe de stockage | Capacité (m^3) | Stock initial (m^3) | Produit initial |
|-----------------------------|--------------------|-------------------------|-----------------|
| Groupe local ($k = 1$) | 9240 | 8496 | 1 |
| Groupe export 1 ($k = 2$) | 13860 | 11431 | 1 |
| Groupe export 2 ($k = 3$) | 13860 | 6069 | 2 |

Tableau 4.11 : Données structurelles concernant les pipelines

| | |
|---|------|
| Débit du pipeline principal db_{pp} (m^3/h) | 4000 |
| Débit de transfert vers le groupe local db_{el} (m^3/h) | 1000 |
| Débit du Downstream db_{ds} (m^3/h) | 600 |

Tableau 4.12 : Matrice de compatibilité des produits

| | | Produit | | |
|---------|---|---------|---|---|
| | | 0 | 1 | 2 |
| Produit | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | 2 | 1 | 0 | 0 |

La solution fournie par le modèle linéaire est illustrée par le Tableau 4.13 et le Tableau 4.14. En effet, le Tableau 4.13 présente les valeurs des critères d'optimisation utilisés dans la fonction objectif, à savoir : le volume total des produits de phosphate envoyé (ligne 1) et le nombre total de blocs des lots (ligne 2). De plus, Il présente également les éléments suivants : le pourcentage d'utilisation du pipeline principal, qui est calculé à partir du volume total des produits de phosphate (ligne 3) ; et le nombre total des lots planifiés durant l'horizon de planification (ligne 4).

En outre, le Tableau 4.14 fournit le détail de l'ordonnancement des lots et comporte les colonnes suivantes :

- La colonne 1 indique le numéro des lots planifiés, allant de 1 à 12 ;
- La colonne 2 précise le numéro des produits, y compris l'eau ;
- La colonne 3 présente le volume des lots ;
- La colonne 4 illustre le numéro des blocs des lots, allant de 1 à 5 ;
- La colonne 5 affiche le volume des blocs ;
- Les colonnes 6 et 7 fournissent respectivement les dates de début et de fin de déchargement de chaque bloc ;
- La colonne 8 indique le groupe de stockage pour chaque bloc.

On remarque que 2 lots comportant le produit local sont déchargés en 5 blocs, alors que les autres lots planifiés sont déchargés en un seul bloc. De plus, la date de début de déchargement du premier lot correspond à la date « 0 », et la date de fin de déchargement du dernier lot coïncide avec la fin de l'horizon de planification, qui est 48 heures. Le déchargement des lots s'effectue de manière successive sans arrêt du pipeline principal.

Tableau 4.13 : Valeurs de la fonction objectif obtenues par le modèle linéaire

| | |
|--|-----------|
| Volume total des produits (m^3) | 185337.39 |
| Nombre total de blocs | 20 |
| Pourcentage d'utilisation du pipeline principal (%) | 96.53% |
| Nombre total de lots | 12 |

Tableau 4.14 : Ordonnement des lots sur 2 jours, fourni par le modèle linéaire

| Numéro du lot | Numéro du produit | Volume du lot (m^3) | Numéro du bloc | Volume du bloc (m^3) | Date de déchargement (h) | | Groupe de stockage k du bloc |
|---------------|-------------------|-------------------------|----------------|--------------------------|--------------------------|-------|--------------------------------|
| | | | | | Début | Fin | |
| 1 | 0 | 1662.61 | 1 | 1662.61 | 0.00 | 0.42 | 0 |
| 2 | 1 | 4000.00 | 1 | 4000.00 | 0.42 | 1.42 | 1 |
| 3 | 0 | 1000.00 | 1 | 1000.00 | 1.42 | 1.67 | 0 |
| 4 | 2 | 9325.05 | 1 | 9325.05 | 1.67 | 4.00 | 3 |
| 5 | 0 | 1000.00 | 1 | 1000.00 | 4.00 | 4.25 | 0 |
| 6 | 1 | 73833.37 | 1 | 21505.03 | 4.25 | 9.62 | 1 |
| 6 | 1 | 73833.37 | 2 | 16069.57 | 9.62 | 13.64 | 2 |
| 6 | 1 | 73833.37 | 3 | 21741.18 | 13.64 | 19.08 | 1 |
| 6 | 1 | 73833.37 | 4 | 7247.06 | 19.08 | 20.89 | 2 |
| 6 | 1 | 73833.37 | 5 | 7270.54 | 20.89 | 22.71 | 1 |
| 7 | 0 | 1000.00 | 1 | 1000.00 | 22.71 | 22.96 | 0 |
| 8 | 2 | 12196.38 | 1 | 12196.38 | 22.96 | 26.00 | 3 |
| 9 | 0 | 1000.00 | 1 | 1000.00 | 26.00 | 26.25 | 0 |
| 10 | 1 | 70913.02 | 1 | 21741.18 | 26.25 | 31.69 | 1 |
| 10 | 1 | 70913.02 | 2 | 14402.70 | 31.69 | 35.29 | 2 |
| 10 | 1 | 70913.02 | 3 | 19486.00 | 35.29 | 40.16 | 1 |
| 10 | 1 | 70913.02 | 4 | 6495.33 | 40.16 | 41.79 | 2 |
| 10 | 1 | 70913.02 | 5 | 8787.81 | 41.79 | 43.98 | 1 |
| 11 | 0 | 1000.00 | 1 | 1000.00 | 43.98 | 44.23 | 0 |
| 12 | 2 | 15069.57 | 1 | 15069.57 | 44.23 | 48.00 | 3 |

Par ailleurs, le diagramme de Gantt illustrant, les lots déchargés sur l'horizon de 2 jours, est représenté par la Figure 4.10. L'axe de temps représente les dates de début et de fin de déchargement de chaque lot et de ses blocs, pour les différents pipelines du réseau : le pipeline principal, le pipeline secondaire 1 fournissant le produit local de la Station Terminale au clients internes, le pipeline secondaire 2 reliant entre le groupe export 1 et le groupe local, et le pipeline secondaire 3 fournissant les produits d'export de la Station Terminale à l'unité du Downstream.

Puisqu'il existe une seule demande de produit d'export sur l'horizon de planification de 2 jours, aucune opération de rinçage des bacs du groupe export 2 n'est requise. Au final, sur l'horizon de 2 jours, un total de $158400m^3$ du produit local K09L est envoyé pour répondre à la demande des clients internes, et un total de $28800m^3$ est acheminé à l'unité du Downstream pour répondre à la demande en produit d'export.

La Figure 4.11 illustre, de son côté, l'évolution du stock des groupes de bacs à la Station Terminale, lors du déchargement des lots planifiés sur l'horizon de 2 jours. On constate que le déchargement d'un lot comportant le produit local, suivi d'un autre qui contient le produit d'export, permet d'obtenir une courbe de variation du stock ayant l'allure d'une sinusoïde. En effet, puisque les lots ayant le même produit possèdent des volumes assez proches ($73833.37m^3$ et $70913.02m^3$ pour le produit local, $12196.38m^3$ et $15069.57m^3$ pour le produit d'export), on constate que la courbe d'évolution du stock présente des ondulations répétées, notamment à partir de la date « 4h ».

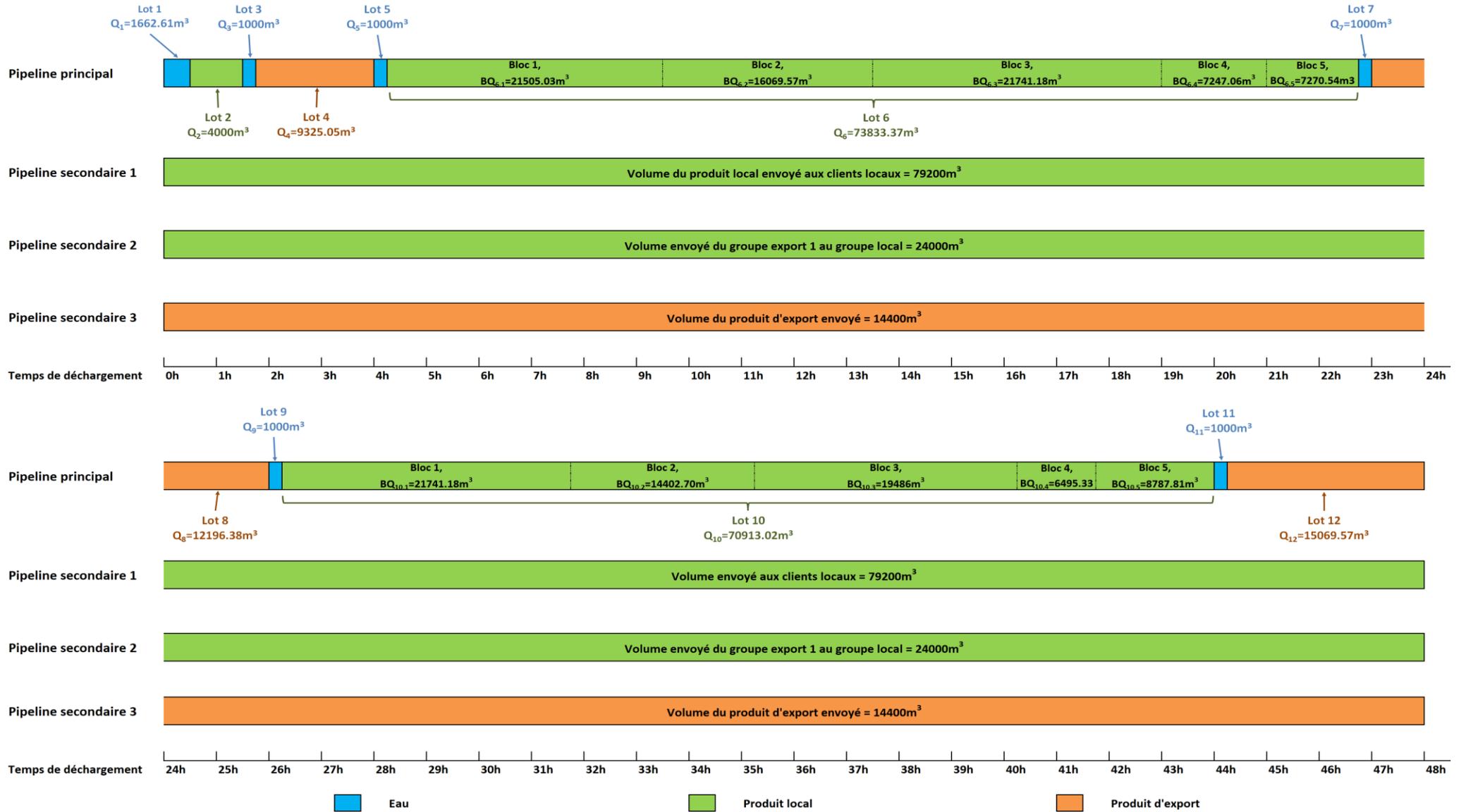


Figure 4.10 : Diagramme de Gantt représentant les lots envoyés dans chaque pipeline du réseau OCP

Section 4.5 - Expérimentations numériques



Figure 4.11 : Evolution du stock du groupe local, du groupe export 1 et du groupe export 2 lors du déchargement des blocs de lots sur un horizon de 2 jours

4.5.4 Génération des instances et évaluation de la performance du modèle

4.5.4.1 Génération des instances

Dans cette partie, les instances sont générées en s'inspirant des données réelles du réseau de pipelines de l'OCP. Les instances sont créées en se basant sur les critères suivants : le nombre de produits $NP \in \{3, 4, 5\}$, la longueur de l'horizon de planification en jour $T \in \{2, 7, 14, 30\}$, le stock initial des groupes de stockage et la demande durant l'horizon temporel. Pour chaque association de l'horizon T et du nombre de produits NP , un ensemble de dix instances sont générées. Pour les instances avec un horizon de 30 jours, seul le groupe d'instances comportant 3 produit est créé. Au final, un nombre de 100 instances rassemblées en 10 groupes d'instances a été généré.

Par ailleurs, la demande totale des produits et l'état initial des stocks sont générés de façon aléatoire. La demande totale du produit local dem_1 est déterminée en se basant sur le débit des clients internes db_{ci} . On suppose que le débit db_{ci} est constant durant l'horizon temporel. Le débit des clients internes db_{ci} est déterminé par un générateur aléatoire selon une distribution uniforme. Les bornes maximale et minimale du débit db_{ci} , notées respectivement $db_{ci_{max}}$ et $db_{ci_{min}}$, sont fixées à +/- 15% du débit moyen qui vaut $3000m^3/h$.

En ce qui concerne la demande des produits d'export $dem_p, p = 2, \dots, NP$, sa borne maximale est déterminée selon la longueur de l'horizon de planification. A partir du Tableau 4.15, chaque groupe d'instances, avec un horizon de planification fixé, possède un nombre maximum de lots (colonne 2). Ce nombre maximum est déterminé en se basant sur le nombre moyen de lots envoyés par jours, qui est 4. Par la suite, le nombre moyen de lots par jours est multipliés par le nombre de jours et par un coefficient, de façon à obtenir un nombre maximum de lots qui soit plus ou moins le double du nombre moyen de lots. Par exemple, pour les instances avec un horizon de deux jours, le nombre moyen de lots est de 8 ; celui-ci est multiplié par 1.75 pour avoir un nombre maximum de lots de 14.

Les colonnes 3 à 6 du Tableau 4.15 représentent ce qui suit :

- Le volume total à envoyer par le pipeline principal est déterminé à la colonne 3. Il est calculé en multipliant le débit du pipeline principal ($db_{pp} = 4000m^3/h$) par la longueur de l'horizon temporel en heures.
- Le volume maximum du produit local pouvant être envoyé est représenté à la colonne 4. Il est déterminé en multipliant la demande maximale du produit local $db_{ci_{max}} = 3450m^3/h$ par la longueur de l'horizon de planification en heures.
- Le volume minimum d'eau à envoyer par le pipeline principal figure à la colonne 5. Il est calculé en multipliant le nombre maximum de lots contenant de l'eau par le volume

minimum d'un lot comportant de l'eau. De plus, puisque les lots qui contiennent de l'eau séparent chaque paire de lots comportant des produits de phosphate, alors on peut considérer que leur nombre maximum représente la moitié de celui de tous les lots. En prenant comme exemple l'horizon de planification de 2 jours, le nombre maximum de lots contenant de l'eau est 7, et le volume minimum d'un lot comportant de l'eau est $V_{min_0} = 1000 m^3$, ce qui donne un volume minimum d'eau de $7000 m^3$ à envoyer durant l'horizon de 2 jours.

- Le volume maximum de produits d'export à envoyer est représenté à la colonne 6. Il est déterminé en retranchant du volume total à envoyer par le pipeline principal (colonne 3), le volume maximum du produit local pouvant être envoyé (colonne 4) et le volume minimum d'eau (colonne 5).

Tableau 4.15 : Détermination du volume maximum des produits d'export à envoyer

| Horizon de planification (jours) | Nombre maximum de lots | Volume total à envoyer (produits de phosphate+ eau) (m^3) | Volume maximum du produit local à envoyer (m^3) | Volume minimum d'eau à envoyer (m^3) | Volume maximum de produits d'export à envoyer (m^3) |
|----------------------------------|------------------------|---|---|--|---|
| 2 | 14 | 192000 | 165600 | 7000 | 19400 |
| 7 | 70 | 672000 | 579600 | 35000 | 57400 |
| 14 | 160 | 1344000 | 1159200 | 80000 | 104800 |
| 30 | 280 | 2880000 | 2484000 | 140000 | 256000 |

Une fois le volume maximum des produits d'export déterminé, il est possible de choisir les bornes maximale et minimale de la demande des produits d'export, notées respectivement dem_{max_p} et dem_{min_p} , en fonction de l'horizon de planification, comme suit :

- Pour un horizon de 2 jours : $dem_{max_p} = 18000m^3$ et $dem_{min_p} = 16000m^3$
- Pour un horizon de 7 jours : $dem_{max_p} = 56000m^3$ et $dem_{min_p} = 46000m^3$
- Pour un horizon de 14 jours : $dem_{max_p} = 100000m^3$ et $dem_{min_p} = 90000m^3$
- Pour un horizon de 30 jours : $dem_{max_p} = 245000m^3$ et $dem_{min_p} = 230000m^3$

Par ailleurs, les valeurs minimale et maximale du stock initial des groupes de bacs, notées respectivement $s_{init_min_v_k}$ et $s_{init_max_v_k}$, sont fixées à +/- 60% des valeurs prises d'une instance réelle. Le Tableau 4.16 fournit les données concernant les niveaux minimum et maximum du stock pour chaque groupe/bac de stockage.

Tableau 4.16 : Données relatives au stock initial pour la génération des instances

| Groupe de stockage | Bac de stockage | Capacité de stockage (m^3) | Niveau minimum du stock ($s_{init_min_v_k}$) (m^3) | Niveau maximum du stock ($s_{init_max_v_k}$) (m^3) |
|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|--|--|
| Groupe local ($k = 1$) | 2 bacs de stockage | 9240 | 2668 | 9240 |
| Groupe export 1 ($k = 2$) | 3 bacs de stockage | 13860 | 4232 | 13860 |
| Groupe export 2 | bac 1 ($k = 3$) | 4620 | 1848 | 4620 |
| | bac 2 ($k = 4$) | 4620 | 1528 | 4620 |
| | bac 3 ($k = 5$) | 4620 | 1424 | 4620 |

En plus des données présentées ci-dessus, d'autres paramètres sont définis, selon le nombre de produits NP : la matrice de compatibilité des produits et la matrice de rinçage. Les matrices de compatibilité pour 4 et 5 produits sont illustrées par la Figure 4.12 : l'élément $m_{p,q}$ de la matrice égale à 1 si le séquençage entre les deux produits p et q est autorisé, 0 sinon. Il est remarqué que seul le produit « 0 », qui désigne l'eau, peut être suivi ou précédé par des produits de phosphate ; aucun séquençage direct entre deux produits de phosphate n'est permis (i.e. $m_{p,q} = 0 \forall p = 1, \dots, NP, q = 1, \dots, NP$).

| | | Produit | | | |
|---------|---|---------|---|---|---|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Produit | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 |

| | | Produit | | | | |
|---------|---|---------|---|---|---|---|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Produit | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figure 4.12 : Matrices de compatibilité pour 4 et 5 produits

La Figure 4.13 représente les matrices de rinçage pour le cas de 4 produits et 5 produits : l'élément de la matrice $mr_{p,q}$ vaut 1 s'il existe un rinçage lorsqu'il y a un passage du produit de basse qualité p au produit de plus haute qualité q , en termes de BPL, au niveau d'un bac du groupe export 2. Par exemple, d'après la matrice figurant à gauche de la Figure 4.13, pour décharger, dans un bac du groupe 2, un lot contenant le produit 3 qui suit un lot comportant le produit 2, il est nécessaire d'effectuer un rinçage de ce bac de stockage. Dans ce cas, un volume de rinçage est retranché au lot contenant le produit de haute qualité q , et est ajouté au lot contenant le produit de basse qualité p , afin d'éviter toute contamination. Pour chaque bac du groupe export 2, le volume de rinçage reçu par le produit p est fixé à $vc_p = 1000m^3$.

| | | Produit | |
|---------|---|---------|---|
| | | 2 | 3 |
| Produit | 2 | 0 | 1 |
| | 3 | 0 | 0 |

| | | Produit | | |
|---------|---|---------|---|---|
| | | 2 | 3 | 4 |
| Produit | 2 | 0 | 1 | 1 |
| | 3 | 0 | | 1 |
| | 4 | 0 | 0 | 0 |

Figure 4.13 : Matrices de rinçage pour 4 et 5 produits

Dans le processus de génération des instances, on commence tout d'abord par générer 10 instances avec un horizon de 2 jours avec 3 produits (i.e. 1 produit d'export). Ensuite, on crée 10 autres instances de 2 jours avec 4 produits (i.e. 2 produits d'export) en gardant le même débit des clients internes ainsi que le même volume représentant la demande des produits externes. Cependant, ce volume est scindé sur les produits externes : par exemple, dans les instances avec 4 produits, il est divisé avec une proportion aléatoire comprise entre 40% et 60% pour le premier produit d'export ; le reste du volume est attribué au second produit d'export. Concernant les instances de 2 jours avec 5 produits (i.e. 3 produits d'export), la demande totale d'export est divisée un pourcentage aléatoire compris entre 30% et 40% pour les deux premiers produits d'export ; le reste de la demande est affecté au troisième produit d'export. La génération des groupes d'instances de 7, 14 et 30 s'effectue de la même manière que celle détaillée pour les instances de 2 jours, et en gardant toujours même débit des clients internes.

4.5.4.2 Performance du modèle linéaire

Le modèle a été résolu en utilisant le solveur GUROBI 9.1 qui permet de linéariser les contraintes non linéaires de type (**Si** (variable_binaire = 0 ou 1) **Alors** (contrainte linéaire)), et ce en utilisant « Indicator Constraints ». Le Tableau 4.17 et le Tableau 4.18 fournissent le temps moyen de résolution du modèle et le GAP moyen par groupe d'instances, en ayant une limitation du temps de calcul fixée à 5 heures (équivalent à 18000 secondes) et à 15 minutes (équivalent à 900 secondes) respectivement. On constate une augmentation considérable du temps de résolution en fonction de l'horizon de planification et du nombre de produits. Effectivement, à partir du Tableau 4.17, et en prenant comme exemple les instances avec 2 jours, le temps de résolution passe d'une moyenne de 9.5 secondes pour le groupe avec 3 produits à une moyenne de 2 heures et 12 minutes (équivalent à 7877.1 secondes) pour le groupe avec 5 produits. De plus, ce temps croît de façon exponentielle lorsqu'on augmente l'horizon temporel pour les instances ayant le même nombre de produits. En effet, si l'on considère les instances comportant 4 produits, le temps de calcul monte d'une moyenne de 15 minutes environs (équivalent à 907.6 secondes) pour celles avec 2 jours, à une moyenne de 5 heures (équivalent à 18000.1 secondes) pour celles avec 7 jours.

Par ailleurs, à partir du Tableau 4.17, une corrélation du GAP moyen avec le nombre de produits peut être constatée pour les groupes d'instances avec 2, 7 et 14 jours. Pour les instances avec 2 jours, la solution optimale est trouvée pour toutes les instances, à l'exception de quatre

appartenant au groupe avec 5 produits. Dans le cas des instances avec 14 jours, il est remarqué que le GAP moyen du groupe avec 5 produits n'est pas calculé. Ceci revient au fait que le modèle linéaire n'ait pas pu obtenir de solution pour quelques instances de ce groupe au bout de 5 heures.

Tableau 4.17 : Performance du modèle linéaire avec une limitation de 5 heures

| Horizon de planification (jours) | Nombre de produits <i>NP</i> | Temps de calcul (secondes) | GAP (%) |
|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------|
| 2 | 3 | 9.5 | 0.00% |
| | 4 | 907.6 | 0.00% |
| | 5 | 7877.1 | 0.27% |
| 7 | 3 | 14401.2 | 0.75% |
| | 4 | 18000.1 | 0.85% |
| | 5 | 18000.1 | 0.75% |
| 14 | 3 | 14425.4 | 1.39% |
| | 4 | 18000.2 | 2.14% |
| | 5 | 18000.2 | - |
| 30 | 3 | 18000.2 | 3.37% |

Il est remarqué, à partir du Tableau 4.18 qu'en fixant la limite du temps de résolution à 15 minutes, le GAP moyen s'accroît légèrement, précisément pour les instances avec 2 et 7 jours. En effet, il passe d'une moyenne de 0.78% (temps limité à 5 heures) à une moyenne de 2.40% (temps limité à 15 minutes) pour les instances avec 7 jours. Ceci explique que le modèle linéaire converge rapidement pour ces groupes d'instances. Néanmoins, on constate que le GAP moyen n'est pas défini pour les groupes d'instances suivants : le groupe avec 7 jours et 5 produits, le groupe avec 14 et 4 produits et le groupe avec 14 jours et 5 produits. Pour ceux-ci, le modèle linéaire ne trouve pas de solution au bout de 15 minutes pour certaines instances.

Tableau 4.18 : Performance du modèle linéaire avec une limitation de 15 minutes

| Horizon de planification (jours) | Nombre de produits <i>NP</i> | Temps de calcul (secondes) | GAP (%) |
|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------|
| 2 | 3 | 9.5 | 0.00% |
| | 4 | 484.3 | 1.11% |
| | 5 | 775.9 | 0.67% |
| 7 | 3 | 691.2 | 1.30% |
| | 4 | 900.1 | 2.85% |
| | 5 | 900.1 | - |
| 14 | 3 | 745.4 | 3.01% |
| | 4 | 900.1 | - |
| | 5 | 900.1 | - |
| 30 | 3 | 900.2 | 8.13% |

Le Tableau 4.19, le Tableau 4.20 et le Tableau 4.21 illustrent les résultats pour trois groupes d'instances : les deux premiers ayant un horizon de 2 jours et avec 3 et 5 produits respectivement ; le dernier groupe avec un horizon de 7 jours et 3 produits. Les résultats présentés concernent particulièrement les éléments suivants : le critère d'optimisation $C1$ qui représente la maximisation du volume total de produits de phosphate envoyé par le pipeline principal ; le taux d'utilisation du pipeline principal en pourcentage pendant l'horizon de planification, qui est déterminé en divisant le volume total des produits de phosphate par le volume total transporté, ce dernier regroupant les produits de phosphate et l'eau ; le second critère $C2$, représentant la minimisation du nombre de blocs des lots, qui est calculé en multipliant le nombre total de blocs des lots nb_bloc par un coefficient ρ fixé à 100 pour toutes les instances.

A partir des résultats des instances de 2 jours avec 3 produits présentés dans le Tableau 4.19, il est constaté que toutes les solutions optimales sont obtenues en quelques secondes. De plus, le taux d'utilisation moyen du pipeline principal atteint une valeur de 95.09% pour les 10 instances. Cependant, ce taux d'utilisation est d'environ 90% seulement pour les instances 4 et 8. Cela pourrait s'expliquer par le faible débit de consommation des clients internes que possède ces instances, qui est aux alentours de $2600m^3/h$. Par conséquent, il ne serait pas possible d'envoyer un volume total important de phosphate, notamment du produit local K09L, au risque de dépasser la capacité de stockage à la Station Terminale.

Tableau 4.19 : Résultats concernant les instances avec 2 jours et 3 produits

| Instance | Valeur fonction objectif | Volume total des produits (m^3) ($C1$) | Utilisation du pipeline principal (%) | Valeur ($C2$) | Temps de calcul (secondes) | GAP(%) |
|------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|-----------------|----------------------------|--------------|
| 1 | 178749.2 | 180848.2 | 94.19% | 2100 | 10.1 | 0.00% |
| 2 | 183001.0 | 185000.0 | 96.35% | 2000 | 6.0 | 0.00% |
| 3 | 184101.0 | 186000.0 | 96.88% | 1900 | 3.8 | 0.00% |
| 4 | 171723.7 | 173922.7 | 90.58% | 2200 | 9.2 | 0.00% |
| 5 | 181381.4 | 183580.4 | 95.61% | 2200 | 28.2 | 0.00% |
| 6 | 182779.6 | 184978.6 | 96.34% | 2200 | 5.2 | 0.00% |
| 7 | 184201.0 | 186000.0 | 96.88% | 1800 | 3.8 | 0.00% |
| 8 | 172482.8 | 174481.8 | 90.88% | 2000 | 17.8 | 0.00% |
| 9 | 183201.0 | 185000.0 | 96.35% | 1800 | 6.8 | 0.00% |
| 10 | 184201.0 | 186000.0 | 96.88% | 1800 | 4.5 | 0.00% |
| Moyenne : | | | 95.09% | | 9.5 | 0.00% |

Concernant les instances de 2 jours avec 5 produits (voir Tableau 4.20), il est constaté que le temps de calcul augmente de manière considérable, et que la limite temporelle fixé à 5 heures est atteinte pour 4 instances (4, 5, 8 et 9). Par ailleurs, en comparant ces résultats avec ceux des instances de 2 jours avec 3 produits, on remarque que, globalement, le taux d'utilisation moyen

du pipeline principal s'accroît, pour atteindre une moyenne de 96.15% pour les instances avec 5 produits, contre 95.09% pour les instances avec 3 produits. Cependant, on constate que ce taux peut diminuer ou augmenter pour les instances qui possèdent le même débit des clients internes : par exemple, d'une part, il diminue de 96.88% pour l'instance 10 avec 3 produits à 96.35% pour l'instance 10 avec 5 produits ; d'autre part, il accroît de 96.34% pour l'instance 6 avec 3 produits à 96.68% pour l'instance 6 avec 5 produits. Cette différence pourrait s'expliquer par la différence des stocks initiaux entre chaque paire d'instances possédant un même débit des clients internes.

Tableau 4.20 : Résultats concernant les instances avec 2 jours et 5 produits

| Instance | Valeur fonction objectif | Volume total des produits (m^3) (C1) | Utilisation du pipeline principal (%) | Valeur (C2) | Temps de calcul (secondes) | GAP(%) |
|----------|--------------------------|--|---------------------------------------|-------------|----------------------------|--------------|
| 1 | 182801.0 | 185000.0 | 96.35% | 2200 | 1693.5 | 0.00% |
| 2 | 182801.0 | 185000.0 | 96.35% | 2200 | 967.4 | 0.00% |
| 3 | 183801.0 | 186000.0 | 96.88% | 2200 | 156.9 | 0.00% |
| 4 | 180601.0 | 183000.0 | 95.31% | 2400 | 18000.0 | 1.14% |
| 5 | 180864.6 | 183463.6 | 95.55% | 2600 | 18000.0 | 0.65% |
| 6 | 183022.5 | 185621.5 | 96.68% | 2600 | 2360.6 | 0.00% |
| 7 | 183901.0 | 186000.0 | 96.88% | 2100 | 402.4 | 0.00% |
| 8 | 180401.0 | 183000.0 | 95.31% | 2600 | 18000.1 | 0.68% |
| 9 | 181494.7 | 183993.7 | 95.83% | 2500 | 18000.0 | 0.28% |
| 10 | 182801.0 | 185000.0 | 96.35% | 2200 | 1190.2 | 0.00% |
| | | Moyenne : | 96.15% | | 7877.1 | 0.27% |

En ce qui concerne les instances de 7 jours avec 3 produits, il est remarqué, à partir du Tableau 4.21, qu'à l'exception des instances 3 et 7, le temps de résolution augmente de manière exponentielle, en comparaison avec les instances de 2 jours et 3 produits : il passe d'une moyenne de 9.5 secondes à environ 2 heures. De plus, la limitation du temps imposée à 5 heures est atteinte pour 8 instances. Néanmoins, le GAP reste inférieur à 2.5% pour les 10 instances, avec une moyenne de 0.75%. Par ailleurs, on remarque une légère augmentation du taux d'utilisation du pipeline principal par rapport aux instances de 2 jours avec 3 produits : ce taux atteint une moyenne de 95.33%, contre une moyenne de 95.09% pour le groupe de 2 jours et 3 produits.

Tableau 4.21 : Résultats concernant les instances avec 7 jours et 3 produits

| Instance | Valeur fonction objectif | Volume total des produits (m^3) (C1) | Utilisation du pipeline principal (%) | Valeur (C2) | Temps de calcul (secondes) | GAP (%) |
|------------------|--------------------------|--|---------------------------------------|-------------|----------------------------|--------------|
| 1 | 631501.0 | 639000.0 | 95.09% | 7500 | 18000.0 | 1.11% |
| 2 | 635501.0 | 642000.0 | 95.54% | 6500 | 18000.0 | 0.47% |
| 3 | 638501.0 | 644000.0 | 95.83% | 5500 | 7.4 | 0.00% |
| 4 | 622968.4 | 631567.4 | 93.98% | 8600 | 18000.1 | 2.41% |
| 5 | 634801.0 | 642000.0 | 95.54% | 7200 | 18000.0 | 0.58% |
| 6 | 637301.0 | 644000.0 | 95.83% | 6700 | 18000.0 | 0.19% |
| 7 | 638501.0 | 644000.0 | 95.83% | 5500 | 4.1 | 0.00% |
| 8 | 624934.1 | 633533.1 | 94.28% | 8600 | 18000.0 | 2.11% |
| 9 | 635001.0 | 642000.0 | 95.54% | 7000 | 18000.1 | 0.55% |
| 10 | 637801.0 | 644000.0 | 95.83% | 6200 | 18000.0 | 0.11% |
| Moyenne : | | | 95.33% | | 14401.2 | 0.75% |

4.5.5 Analyse de la sensibilité du modèle

Dans cette section on présente, d'une part, la convergence du modèle proposé en fonction des instances (sous-section 4.5.5.1) ; d'autre part, une étude sur l'impact des paramètres sur le temps de résolution des instances (sous-section 4.5.5.2).

4.5.5.1 Analyse de la convergence du modèle

L'analyse de la convergence du modèle est réalisée sur 5 instances dont la limitation temporelle de 5 heures est atteinte : deux instances avec un débit des clients internes faible (i.e. db_{ci} est d'environ $2600m^3/h$), il s'agit des instances 8 du groupe de 2 jours et 5 produits, notée « instance 8_2_5 », et du groupe de 7 jours et 5 produits, notée « instance 8_7_5 » ; trois instances ayant un débit des clients internes plus élevé que les deux premières (i.e. db_{ci} est de l'ordre de $3000m^3/h$), ce sont les instances 2 du groupe de 7 jours et 5 produits, notée « instance 2_7_5 », du groupe de 14 jours et 5 produits, notée « instance 2_14_5 », et du groupe de 30 jours et 3 produits, notée « instance 2_30_3 ».

Le graphe illustrant la variation du GAP en fonction du temps de résolution, pour l'instance 8_2_5 et l'instance 8_7_5, est représenté par les figures suivantes : Figure 4.14 et Figure 4.15. On constate que, par rapport à l'instance 8_2_5, la première solution est obtenue après uniquement 3 secondes ; pour l'instance 8_7_5, le solveur trouve une première solution après 1187 secondes (équivalent à 19 minutes et 47 secondes).

Néanmoins, le GAP diminue rapidement pour la première instance, où il atteint 1.75% après 601s (soit 10 minutes et 1 seconde). En revanche, concernant l'instance 8_7_5, la qualité de la solution s'augmente progressivement, pour se situer à 5.09% à 7224 secondes (équivalent à 2 heures et 24 secondes). Ensuite, le GAP évolue de manière assez lente jusqu'à la fin de la

limite de 5 heures, pour stagner à 0.68% pour l'instance 8_2_5, et à 1.75% pour l'instance 8_7_5.

| Instance 8 (2 jours et 5 produits) | |
|--|--|
| Temps d'exécution du modèle (secondes) | GAP (%) par rapport à la solution optimale |
| 3 | 20.90% |
| 4 | 20.80% |
| 10 | 18.60% |
| 15 | 15.40% |
| 20 | 12.80% |
| 60 | 10.00% |
| 70 | 5.56% |
| 71 | 2.79% |
| 80 | 2.11% |
| 90 | 2.00% |
| 297 | 1.82% |
| 601 | 1.75% |
| 902 | 1.37% |
| 1500 | 1.03% |
| 3602 | 0.91% |
| 7203 | 0.82% |
| 10802 | 0.75% |
| 14402 | 0.71% |
| 18000 | 0.68% |

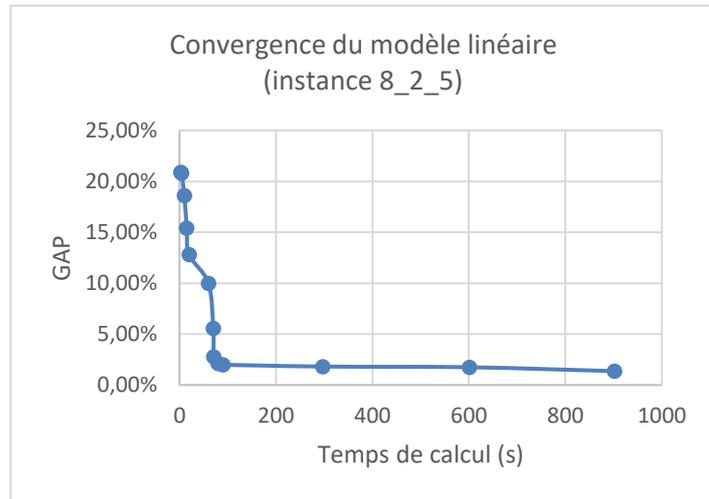


Figure 4.14 : Convergence du modèle linéaire pour l'instance 8 avec 2 jours et 5 produits

| Instance 8 (7 jours et 5 produits) | |
|--|--|
| Temps d'exécution du modèle (secondes) | GAP (%) par rapport à la solution optimale |
| 1187 | 25.10% |
| 1203 | 22.70% |
| 1214 | 19.50% |
| 1242 | 14.50% |
| 1265 | 12.90% |
| 1341 | 11.00% |
| 1518 | 9.55% |
| 2901 | 8.81% |
| 3609 | 8.65% |
| 5034 | 7.40% |
| 5408 | 6.80% |
| 6504 | 6.35% |
| 7224 | 5.09% |
| 8025 | 3.66% |
| 9068 | 2.52% |
| 10073 | 2.18% |
| 10793 | 1.85% |
| 14413 | 1.77% |
| 18000 | 1.75% |

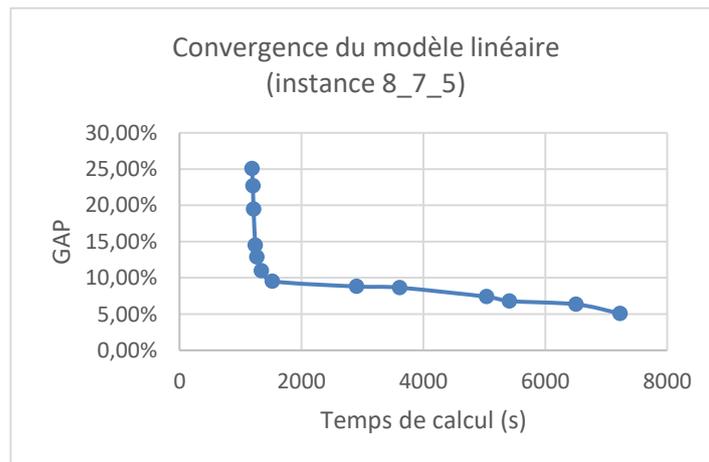


Figure 4.15 : Convergence du modèle linéaire pour l'instance 8 avec 7 jours et 5 produits

Les résultats ci-dessus sont comparés à ceux obtenus pour les instances ayant un débit des clients internes plus élevé : les instances 2 du groupe de 7 jours et 5 produits (notée « instance 2_7_5 », du groupe de 14 jours et 5 produits, notée « instance 2_14_5 », et du groupe de 30 jours et 3 produits, notée « instance 2_30_3 ».

L'évolution de l'écart en fonction du temps de calcul est représentée sous forme d'un graphe illustré par les figures suivantes : la Figure 4.16, la Figure 4.17 et la Figure 4.18. On remarque que l'amélioration de la première solution est réalisée de manière plus rapide, par rapport aux instances précédentes. En effet, la première solution est obtenue avec un écart inférieur à 15% par rapport à la solution optimale : 13.30% après 3 minutes et 18 secondes pour l'instance 2_7_5 ; 14.00% après 14 minutes et 46 secondes pour l'instance 2_14_5 ; et 13.90% après 37 secondes pour l'instance 2_30_3.

Ensuite, le GAP diminue de manière assez rapide, pour atteindre les valeurs suivantes : 1.90% après 10 minutes et 11 secondes pour l'instance 2_7_5 ; 1.93% après 37 minutes et 56 secondes pour l'instance 2_14_5 ; et 2.63% après 35 minutes et 42 secondes pour l'instance 2_30_3. Finalement, la qualité de la solution s'améliore de façon lente jusqu'à la limitation imposée de 5 heures, pour se placer à 0.41% pour l'instance 2_7_5, à 0.31% pour l'instance 2_14_5, et à 0.36% pour l'instance 2_30_3.

| Instance 2 (7 jours et 5 produits) | |
|--|--|
| Temps d'exécution du modèle (secondes) | GAP (%) par rapport à la solution optimale |
| 198 | 13.30% |
| 211 | 12.80% |
| 222 | 11.80% |
| 240 | 11.60% |
| 270 | 11.00% |
| 326 | 9.95% |
| 508 | 5.46% |
| 527 | 4.41% |
| 547 | 2.86% |
| 589 | 2.37% |
| 611 | 1.90% |
| 918 | 1.11% |
| 1061 | 0.78% |
| 2012 | 0.55% |
| 3627 | 0.46% |
| 5112 | 0.42% |
| 7189 | 0.41% |
| 10833 | 0.41% |
| 14416 | 0.41% |
| 18000 | 0.41% |

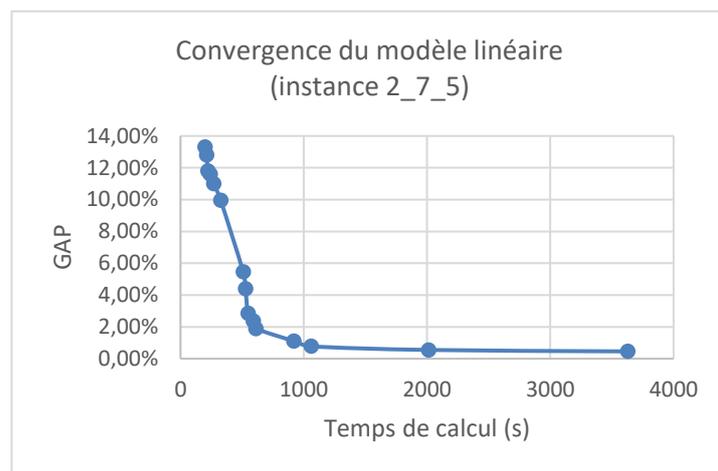


Figure 4.16 : Convergence du modèle linéaire pour l'instance 2 avec 7 jours et 5 produits

| Instance 2 (14 jours et 5 produits) | |
|---|---|
| Temps d'exécution du modèle (secondes) | GAP (%) par rapport à la solution optimale |
| 886 | 14.00% |
| 892 | 13.60% |
| 903 | 12.20% |
| 958 | 11.50% |
| 961 | 8.25% |
| 1005 | 8.16% |
| 1204 | 7.94% |
| 1542 | 5.93% |
| 1974 | 3.49% |
| 2178 | 2.31% |
| 2276 | 1.93% |
| 3612 | 1.45% |
| 5256 | 0.99% |
| 7199 | 0.97% |
| 10082 | 0.85% |
| 10842 | 0.63% |
| 11614 | 0.49% |
| 14539 | 0.37% |
| 18000 | 0.31% |

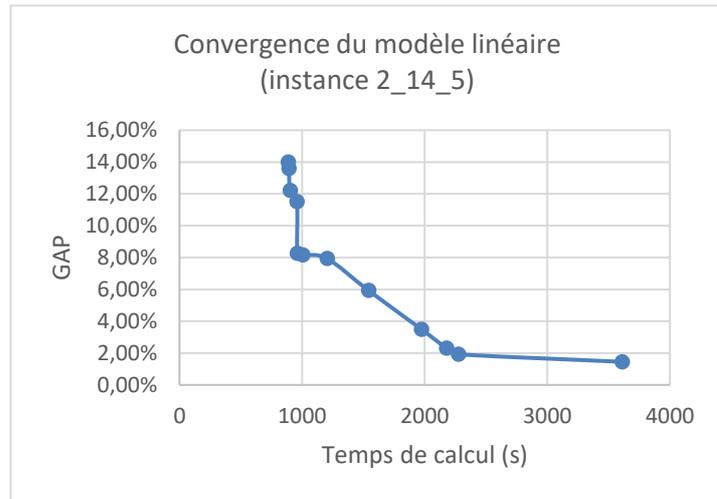


Figure 4.17 : Convergence du modèle linéaire pour l'instance 2 avec 14 jours et 5 produits

| Instance 2 (30 jours et 3 produits) | |
|---|---|
| Temps d'exécution du modèle (secondes) | GAP (%) par rapport à la solution optimale |
| 37 | 13.90% |
| 44 | 12.20% |
| 53 | 10.20% |
| 76 | 9.31% |
| 83 | 7.36% |
| 107 | 7.27% |
| 124 | 6.32% |
| 170 | 6.16% |
| 197 | 5.41% |
| 297 | 4.54% |
| 686 | 3.91% |
| 902 | 3.68% |
| 1505 | 2.81% |
| 2142 | 2.63% |
| 3601 | 2.46% |
| 4477 | 1.98% |
| 6004 | 1.50% |
| 7206 | 1.23% |
| 7573 | 0.92% |
| 10820 | 0.67% |
| 14423 | 0.43% |
| 18000 | 0.36% |

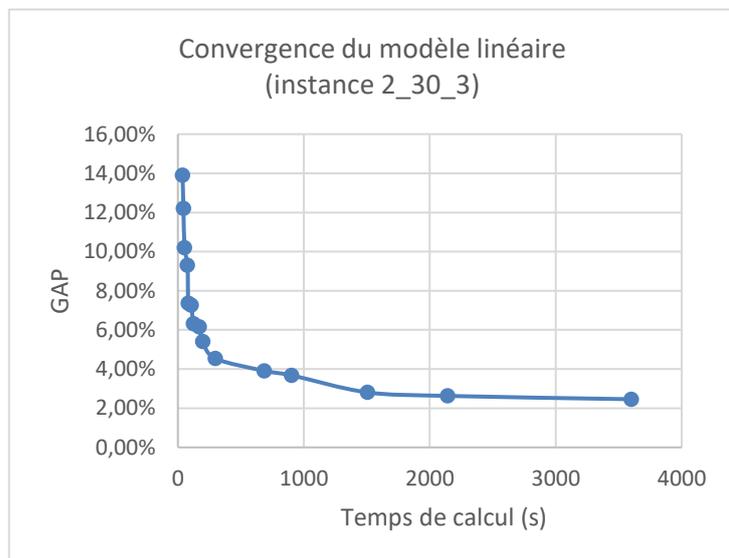


Figure 4.18 : Convergence du modèle linéaire pour l'instance 2 avec 30 jours et 3 produits

Ainsi, à partir des résultats présentés pour les instances ayant un horizon de 2 jours (i.e. instance 8_2_5) ou ayant un débit des clients internes de plus de $3000m^3/h$ (i.e. instance 2_7_5, instance 2_14_5 et instance 2_30_3), il se révèle que le modèle linéaire permet de fournir des solutions ayant un GAP inférieur à 2% au bout d'une heure. De ce fait, on considère que le modèle proposé est utilisable dans le cadre industriel, pour étudier le problème d'ordonnement du réseau de pipeline de l'OCP. Néanmoins, pour certaines instances ayant un horizon de plus 7 jours et un débit des clients internes faible (environ $2600m^3/h$), notamment l'instance 8_7_5, l'obtention d'une solution de bonne qualité, avec un GAP inférieur à 2%, nécessite un temps de résolution plus important.

4.5.5.2 Impact des paramètres d'instance sur le temps de résolution

L'étude réalisée dans cette partie se base sur deux ensembles d'instances : un ensemble de 2 jours avec 5 produits, et un ensemble de 7 jours avec 4 produits. Les paramètres d'instance concernés dans cette étude sont les suivants: le débit des clients internes db_{ci} et le nombre maximum de lots N . La limitation du temps de résolution est fixée à 2 heures.

La première étude est effectuée sur trois configurations d'un groupe de 2 jours et 5 produits contenant 10 instances, en variant le débit des clients internes : pour la configuration 1, le débit est fixé à $3200m^3/h$; pour la configuration 2, le débit égale à $2800m^3/h$; et pour la configuration 3, le débit est établi à $2600m^3/h$. Le Tableau 4.22 présente les résultats obtenus pour les trois configurations de chacune des 10 instances, en termes de temps de résolution et de l'écart par rapport à la solution optimale. On remarque que la diminution du débit des clients internes engendre une augmentation importante du temps de résolution. En effet, ce dernier passe d'une moyenne de 409.1 secondes (équivalent à 6 minutes et 49 secondes) pour les scénarios avec un débit $db_{ci} = 3200m^3/h$, à une moyenne de 2 heures pour les scénarios avec un débit $db_{ci} = 2600m^3/h$.

De plus, on constate que plus le débit des clients internes diminue, plus l'écart par rapport à la solution optimale augmente. Le modèle linéaire permet de trouver la solution optimale pour tous les scénarios avec un débit $db_{ci} = 3200m^3/h$. Cependant, la solution optimale n'est obtenue que pour 2 scénarios, sous la limitation temporelle de 2 heures, pour la configuration avec un débit $db_{ci} = 2800m^3/h$, et le GAP moyen atteint 0.75%. Pour la configuration avec un débit $db_{ci} = 2600m^3/h$, le modèle atteint la limitation de 2 heures pour les 10 scénarios, et le GAP moyen augmente pour se situer à 1.00%.

Par ailleurs, on remarques qu'il existe une diminution du GAP suite à la réduction du débit des clients internes pour certains scénarios : par exemple, le GAP passe de 1.07% pour le scénario 2 avec un débit de $db_{ci} = 2800m^3/h$ à 0.85% pour le scénario 2 avec un débit $db_{ci} = 2600m^3/h$. Cette diminution du GAP pourrait s'expliquer par l'état initial considéré

des groupes de stockage (stock initial et produit initial contenu dans les bacs du groupe export 2) : pour une même configuration, cet état initial diffère d'un scénario à un autre.

Tableau 4.22 : Impact du débit des clients internes sur le temps de résolution, en considérant trois configurations d'un groupe avec 2 jours et 5 produits

| Instance | Débit des clients internes ($db_{ci} = 3200m^3/h$) | | Débit des clients internes ($db_{ci} = 2800m^3/h$) | | Débit des clients internes ($db_{ci} = 2600m^3/h$) | |
|----------------|---|--------------|---|--------------|---|--------------|
| | Temps de calcul (secondes) | GAP (%) | Temps de calcul (secondes) | GAP (%) | Temps de calcul (secondes) | GAP (%) |
| 1 | 198.7 | 0.01% | 1534.7 | 0.01% | 7200.0 | 1.22% |
| 2 | 1144.5 | 0.00% | 7200.0 | 1.07% | 7200.1 | 0.85% |
| 3 | 482.2 | 0.00% | 7200.1 | 0.84% | 7200.0 | 0.94% |
| 4 | 64.8 | 0.00% | 1163.3 | 0.00% | 7200.1 | 1.24% |
| 5 | 417.2 | 0.00% | 7200.3 | 1.07% | 7200.1 | 1.22% |
| 6 | 480.7 | 0.00% | 7200.2 | 0.88% | 7200.1 | 1.17% |
| 7 | 320.2 | 0.00% | 7200.4 | 0.72% | 7200.1 | 0.83% |
| 8 | 427.2 | 0.00% | 7200.0 | 1.12% | 7200.0 | 0.80% |
| 9 | 316.7 | 0.00% | 7200.2 | 0.72% | 7200.0 | 0.83% |
| 10 | 238.2 | 0.00% | 7200.1 | 1.06% | 7200.1 | 0.92% |
| Moyenne | 409.1 | 0.00% | 6029.9 | 0.75% | 7200.1 | 1.00% |

Par ailleurs, une seconde étude est menée sur trois configurations d'un groupe de 7 jours et 4 produits, comportant 10 instances, en modifiant le nombre maximum de lots N : pour la première configuration, ce nombre est établi à 60 ; pour la seconde configuration, il est fixé à 70 ; et pour la dernière configuration, il est égal à 80. Au total, 30 scénarios ont été créés. Le Tableau 4.23 regroupe les résultats des tests effectués pour tous les scénarios concernant le temps de calcul et le GAP. On observe que le modèle linéaire atteint la limite imposée de 2 heures pour l'ensemble des trois configurations.

En outre, on remarque que, globalement, l'écart par rapport à la solution optimale diminue en augmentant le nombre maximum de lots. En effet, le GAP moyen atteint 1.55% pour la configuration avec un nombre maximum de lots $N = 60$, alors qu'il décroît pour se placer à 0.79% pour la configuration avec $N = 80$. De plus, on constate que cette diminution du GAP concerne principalement les scénarios ayant un débit des clients internes faible (i.e. instances 4 et 8) : l'écart égale à 5.49% et 7.00% pour les scénarios 4 et 8 respectivement de la première configuration avec $N = 60$; il descend jusqu'à atteindre 1.96% et 2.80% pour les scénarios 4 et 8 respectivement de la dernière configuration avec $N = 80$.

Par ailleurs, il est remarqué que le GAP s'accroît avec l'augmentation du nombre maximum de lots, notamment pour les derniers scénarios : il passe de 0.28% pour le scénario 10 avec un nombre maximum de lots $N = 70$ à 0.31% pour le scénario 10 avec $N = 80$. Ce cas pourrait à

son tour être influencé par l'état initial des stocks, qui varie pour les scénarios d'une même configuration.

Tableau 4.23 : Impact du nombre maximum de lots sur le temps de résolution, en considérant trois configurations d'un groupe avec 7 jours et 4 produits

| Instance | Débit des clients internes (m^3/h) | Nombre maximum de lots ($N = 60$) | | Nombre maximum de lots ($N = 70$) | | Nombre maximum de lots ($N = 80$) | |
|----------------|--|-------------------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------|-------------------------------------|--------------|
| | | Temps de calcul (secondes) | GAP (%) | Temps de calcul (secondes) | GAP (%) | Temps de calcul (secondes) | GAP (%) |
| 1 | 2835 | 7200.3 | 0.69% | 7200.1 | 1.48% | 7200.1 | 0.82% |
| 2 | 3058 | 7201.0 | 0.58% | 7200.2 | 0.20% | 7200.3 | 0.20% |
| 3 | 3284 | 7200.0 | 0.11% | 7200.0 | 0.11% | 7200.2 | 0.11% |
| 4 | 2612 | 7200.1 | 5.49% | 7200.1 | 2.93% | 7200.2 | 1.96% |
| 5 | 2837 | 7200.1 | 0.28% | 7200.2 | 0.53% | 7200.1 | 0.51% |
| 6 | 3061 | 7200.0 | 0.25% | 7200.2 | 0.25% | 7200.2 | 0.25% |
| 7 | 3286 | 7200.1 | 0.09% | 7200.2 | 0.09% | 7200.3 | 0.09% |
| 8 | 2614 | 7200.0 | 7.00% | 7200.0 | 4.16% | 7200.1 | 2.80% |
| 9 | 2839 | 7200.1 | 0.70% | 7200.1 | 0.51% | 7200.1 | 0.80% |
| 10 | 3063 | 7200.2 | 0.28% | 7200.2 | 0.28% | 7200.1 | 0.31% |
| Moyenne | | 7200.2 | 1.55% | 7200.1 | 1.05% | 7200.2 | 0.79% |

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous intéressons au problème d'ordonnement du réseau de pipelines de type « tree-structure » (noté « PORP-TS ») du Groupe OCP dans un cadre minier. Le réseau de pipeline de l'OCP est composé d'une source, qui est la Station de Tête, et de plusieurs destinations (la Station Terminale, les clients internes et l'unité du Downstream). Ces composants sont reliés entre eux par quatre pipelines : un pipeline principal et trois pipelines secondaires. Nous présentons un modèle mixte qui se base sur un axe temporel de déchargement à la Station Terminale. Le modèle tient en compte des contraintes de gestion de stock au niveau de la Station Terminale, et des contraintes techniques liées à la configuration du système étudié et aux produits, notamment la séparation entre les produits et le rinçage des bacs de stockage. La fonction objectif du modèle comporte deux critères d'optimisation : la maximisation du volume total des produits de phosphate et la minimisation du nombre total des blocs de lots.

Les expérimentations numériques reposent sur ensemble de 100 instances créées à partir d'un cas réel de l'OCP. Le modèle est capable de fournir des solutions optimales en un temps de résolution acceptable (quelques secondes à quelques minutes) pour les instances avec 2 jours, et des solutions de qualité (avec un GAP par rapport à la solution optimale inférieur à 2%) pour les instances de 7, 14 et 30 jours, au bout de quelques heures. Dans le cadre d'application industrielle du modèle, une analyse de la convergence du modèle est établie pour identifier l'existence d'un bon compromis entre la qualité des solutions et le temps de résolution. Le

résultat montre que la convergence du modèle se ralentit fortement au bout d'une heure de résolution pour la plupart des instances. Par ailleurs, une analyse de la sensibilité du modèle en fonction du débit de client internet est effectuée. Une telle étude nous permet de mieux configurer le modèle en fonction face à des différentes situations lors de l'application réelle de celui-ci.

Conclusion générale

Synthèse des travaux réalisés

L'industrie minière s'avère essentielle pour l'économie des sociétés au niveau mondial, vu sa grande contribution au développement industriel des communautés, à travers la génération des bénéfices et la stabilisation des populations. En particulier, l'industrie des phosphates est considérée comme une activité clé dans le secteur agricole, puisqu'elle permet la production des engrais.

Actuellement, les préoccupations auxquelles est confrontée l'industrie des phosphates s'articulent principalement autour des points suivants : l'exploitation croissante du minerai de phosphate, ce qui provoque une difficulté d'accès à celui-ci, la sécurité alimentaire, les fluctuations du marché mondial du phosphate ainsi que les effets sur l'environnement. Par conséquent, l'exploration de ce minerai au niveau des zones géographiques profondes impliquera des développements majeurs dans les technologies d'extraction minière, ainsi que le traitement des minerais, tout en prenant en considération le respect de l'environnement.

Dans ce cadre, les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit ont été menés au sein du Groupe OCP. Cette entreprise marocaine est considérée comme acteur clé dans le marché mondial du phosphate, à travers la production de l'exportation du phosphate et de ses dérivés, notamment les engrais. En vue de faire face aux défis de la sécurité alimentaire ainsi qu'aux variations du marché mondial, le Groupe OCP a mis en œuvre une stratégie orientée avant tout vers l'accroissement des capacités de production des mines et des usines de traitement, la flexibilité industrielle et la maîtrise du coût de revient. Dans ce contexte, le Groupe OCP a pour objectif d'augmenter la performance opérationnelle au niveau des différents maillons de sa chaîne de valeur, en mettant en place de technologies innovantes et de nouveaux processus d'extraction et de traitement des minerais. Cette mutation profonde des outils et pratiques de production pose réels problèmes susceptibles de conduire à des problématiques de recherche en management industriel.

De ce fait, les travaux de cette thèse sont réalisés dans le cadre de la chaire OCP-SA d'optimisation industrielle, rattachée à l'EMINES *School of Industrial Management*-Université Mohamed VI Polytechnique, et au Groupe OCP. Ils se focalisent sur la chaîne Axe Nord du Groupe OCP, qui constitue un des trois axes indépendants de sa chaîne logistique complexe, opérant de manière simultanée. La chaîne Axe Nord regroupe les entités suivantes : plusieurs mines d'extraction à partir desquelles sont extraits les minerais de phosphate, désignés

par produits primaires, chacun étant distingué par une composition chimique ; d'unités de traitement qui agissent sur la quantité et la composition chimique des produits primaires et les transforment en produits intermédiaires, ces derniers subissant par la suite un mélange pour obtenir les produits finis de phosphate ; un réseau de pipelines composé d'un pipeline principal et de plusieurs pipelines secondaire qui assure le transport des produits finis de phosphate, des usines chimiques (considérées comme clients internes) qui produisent l'acide phosphorique et les engrais à partir des produits finis de phosphate transportés par le réseau de pipelines, ainsi qu'un port pour l'expédition des produits finis de phosphate pour les clients externes.

En conséquence, l'objectif est de satisfaire les clients internes et externes en adoptant une bonne gestion des minerais disponibles sur l'horizon de planification défini. La demande porte sur des produits finis de phosphate obtenus au moyen de mélange de minerais extraits. Ces produits finis doivent être transportés en lots par le réseau de pipelines en vue de répondre aux demandes des clients sur l'horizon temporel fixé. Le transport des produits finis de phosphate présente quelques spécificités, à savoir : les lots de produits transportés sont séparés par des volumes d'eau, les bacs de stockage accueillant les produits de phosphate destinés aux clients externes sont polyvalents, et les bacs de stockage peuvent être remplis et vidés de façon simultanée. Dans ce contexte, la problématique identifiée s'articule autour du thème de la planification et de l'ordonnancement des systèmes industriels, et en particulier porte sur l'ordonnancement du réseau de pipelines OCP au niveau de sa chaîne Axe Nord. Les questions de recherche de cette thèse ont été formulées comme suit :

- A partir des demandes de produits finis de phosphate sur un horizon de planification fixé, comment obtenir, d'une part, la séquence de lots de produits finis à envoyer par pipeline, pour répondre à ces demandes, et comment déterminer, d'autre part, les dates de chargement et de déchargement de chaque lot de la séquence, en prenant en compte les contraintes de gestion de stock en aval ?
- Comment résoudre le problème d'ordonnancement du réseau de pipeline OCP en adaptant les solutions d'ordonnancement de pipelines trouvées dans la littérature, sachant que le système industriel étudié peut fonctionner selon deux cas (un cas de deux demandes et un cas de plusieurs demandes), et qu'il est caractérisé par les éléments suivants : 1) les lots de produits finis envoyés dans le pipeline principal sont séparés par des volumes d'eau, 2) les bacs de stockage des produits externes en aval sont polyvalents et 3) le remplissage et le soutirage des bacs de stockage en aval s'effectuent de manière simultanée ?

Contributions de la thèse

Dans l'objectif de répondre à ses questions de recherche, nous avons mis en œuvre la recherche action comme démarche scientifique. En effet, à partir de la problématique industrielle formulée dans le premier chapitre, nous avons modélisé les différents processus du

système logistique étudié, ce qui nous a permis de mieux comprendre son fonctionnement à travers l'organisation des flux. L'objectif de cette modélisation est de pouvoir apporter une aide, la meilleure possible, à la prise de décision, et ce malgré la complexité du système considéré. Par la suite, l'analyse de la littérature présentée au chapitre 1 a permis de positionner le problème industriel par rapport aux travaux publiés qui étudient les problèmes d'ordonnancement des pipelines, selon la structure du pipeline. Par conséquent, la problématique industrielle a été ramenée à deux problèmes d'ordonnancement à la fois, étudiés dans la littérature, en fonction des demandes des clients à satisfaire sur un horizon de planification fixé :

- Le Problème d'Ordonnancement des Pipelines linéaires Multiproduits de type « one-to-one » (POPM-T1) est traité quand le réseau de pipeline OCP fonctionne pour répondre à deux demandes au plus ;
- Le Problème d'Ordonnancement de Réseau de Pipelines de type « tree-structure » (PORP-TS) est considéré lorsque le réseau de pipeline OCP opère en vue de satisfaire plusieurs demandes sur l'horizon temporel défini.

Ainsi, en vue de traiter ces deux problèmes, les travaux de recherche effectués ont porté sur la proposition de méthodes exactes (modèles mathématiques) et de méthodes approchées (heuristiques et méta heuristiques), permettant de fournir un ordonnancement des produits afin de répondre aux demandes des clients sur un horizon de planification bien défini, tout en prenant en considération les contraintes techniques du système étudié. Par conséquent, les contributions de cette thèse peuvent être résumées en trois points principaux :

- Proposition d'un modèle linéaire mixte, présenté au chapitre 2, pour traiter le problème d'ordonnancement d'un pipeline linéaire multiproduits de type « one-to-one » (POPM-T1). Cette étude est réalisée dans le contexte de l'industrie pétrolière, puisque la majorité des travaux publiés dans la littérature traitent ce type de problème dans le domaine pétrolier ; par ailleurs, au meilleur de nos connaissances, aucun travail de recherche portant sur le problème d'ordonnancement des pipelines ne considère le domaine minier. Le modèle linéaire vise à fournir un ordonnancement des produits qui satisfait les demandes exprimées sur un horizon temporel fixé. La fonction objectif du modèle comprend deux critères d'optimisation, à savoir la maximisation du volume des lots de produits à envoyer la minimisation le volume total contaminé entre les lots. De plus, le modèle linéaire prend en considération la gestion des stocks en aval, et certaines contraintes spécifiques à l'industrie pétrolière, telles que le respect des séquences autorisées et interdites des produits, ainsi que la prise en compte du temps de stabilisation des produits stockés en aval avant leur livraison aux clients. Néanmoins, le modèle proposé peut être adapté au cas de l'OCP, dans le contexte du domaine minier, en ajustant certains paramètres d'entrée en vue de considérer les spécificités liées au transport des produits de phosphate. Les résultats obtenus des tests effectués prouvent

que le modèle linéaire proposé peut être applicable dans le contexte industriel, avec un horizon de planification allant jusqu'à un mois.

- Développement d'une méthode approchée, abordée au chapitre 3, pour l'étude du problème d'ordonnancement d'un pipeline linéaire multiproduits de type « one-to-one » (POPM-T1) dans le domaine pétrolier. Cette méthode comprend deux parties principales : une méthode de construction et une méthode d'amélioration locale. La méthode de construction est une heuristique gloutonne randomisée qui permet la construction d'une solution initiale de façon itérative. La solution initiale obtenue est une séquence de lots de produits à envoyer dans le pipeline, chaque lot possédant un volume, un produit et des dates de chargement et déchargement. Ensuite, la méthode d'amélioration est appliquée sur la solution initiale pour améliorer sa qualité, en effectuant toute augmentation possible du volume des lots sans modifier leur séquence. A partir des expérimentations numériques réalisées, la méthode approchée fournit des solutions de qualité, avec un GAP inférieur à 2% par rapport à la solution optimale, et en un temps de calcul plus réduit que le modèle linéaire proposé dans le chapitre 2, notamment pour les instances de grande taille. La méthode approchée proposée peut être adaptée au cas de l'OCP dans le domaine minier, à l'instar du modèle présenté au chapitre 2.
- Développement d'un modèle linéaire mixte, présenté au chapitre 4, pour traiter le problème d'ordonnancement de réseau de pipelines de type « tree-structure » (PORP-TS) lié au Groupe OCP, dans le contexte de l'industrie minière. L'objectif du modèle est de fournir un ordonnancement du réseau de pipelines du Groupe OCP, afin de répondre à la demande des différents clients, internes et externes, sur un horizon de planification fixé. La fonction objectif du modèle se compose de deux critères d'optimisation : maximiser le volume des lots et minimiser le nombre de blocs des lots. En plus des contraintes considérées relatives à la gestion des stocks en aval et à la séparation des lots par des volumes d'eau, le modèle proposé prend en compte d'autres contraintes techniques liées au cas de plusieurs demandes à satisfaire, à savoir : le caractère polyvalent des stocks des produits de phosphate externes et l'opération de rinçage des stocks polyvalents. Sur la base des tests réalisés, le modèle linéaire proposé permet de fournir la solution optimale pour les instances avec un horizon à court terme, ainsi que des solutions avec un GAP qui ne dépasse pas 5% pour le cas de la planification sur le niveau tactique (un mois).

Perspectives de recherche

Les travaux de recherche effectués durant cette thèse permettent d'explorer plusieurs perspectives de recherche, à savoir :

- Réalisation des tests sur des instances réelles pour les deux problèmes d'ordonnancement de pipelines étudiés, à savoir : le Problème d'Ordonnancement de Pipelines Multiproduits de type « one-to-one » [POPM-T1] et le Problème d'ordonnancement de réseau de pipelines de type « Tree-Structure » [PORP-TS].
- Adaptation du modèle linéaire proposé au chapitre 4 pour traiter le [PORP-TS], en prenant en compte certaines contraintes techniques, afin de pouvoir se rapprocher davantage d'une reproduction fine de la réalité. En effet, il serait intéressant de considérer des demandes variables durant le l'horizon de planification, puisque les demandes réelles des clients internes varient d'un jour à un autre. Par ailleurs, on pourrait envisager d'intégrer les arrêts programmés du pipeline principal dus à une maintenance préventive (en amont ou en aval).
- Couplage du modèle linéaire proposé pour le [PORP-TS] avec le modèle développé pour résoudre le problème du mélange des produits en amont (il s'agit du mélange des minerais extraits pour obtenir les produits finis de phosphate d'une qualité définie par le client). Ce modèle a été proposé dans le cadre d'une thèse de doctorat (Bamoumen, 2022). Ce couplage permettrait d'effectuer des tests avec des données réelles du Groupe OCP, afin de pouvoir évaluer la performance de cette méthode, qui serait sous forme d'un chaînage de deux modèles.
- Développement d'une méthode approchée pour étudier le [PORP-TS] lié au cas du Groupe OCP dans le domaine minier, vu que le modèle linéaire nécessite, dans certains cas, plus de temps de calcul pour obtenir une solution optimale, notamment pour les instances de grande taille, avec un horizon de planification dépassant deux semaines.

Bibliographie

- Arruda, L.V., Neves-Jr, F., Yamamoto, L., 2010. Using MOGA to order batches in a real world pipeline network, in: *International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems*. Springer, pp. 546–555.
- Bamoumen, M., Belil, S., Elfirdoussi, S., Ren, L., Tchernev, N., 2019. A hybrid heuristic for the multi-product straight pipeline scheduling problem. *IFAC-PapersOnLine* 52, 535–540.
- 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, in: *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems*. Springer, pp. 299–306.
- Bamoumen, M., 2022. Une approche de Blending dynamique pour la planification court terme de chaînes logistiques minières : cas de l’Axe Nord du Groupe OCP. Thèse de l’Université Rennes1.
- BeheshtiAsl, N., 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.
- Bellman, R., 1954. The theory of dynamic programming. *Bulletin of the American Mathematical Society* 60, 503–515.
- Bertsimas, D., Sim, M., 2004. The price of robustness. *Operations research* 52, 35–53.
- Blum, C., Roli, A., 2003. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM computing surveys (CSUR)* 35, 268–308.
- Bockmayr, A., Hooker, J.N., 2005. Constraint programming. *Handbooks in Operations Research and Management Science* 12, 559–600.
- Boschetto, S.N., Magatão, L., Brondani, W.M., Neves-Jr, F., Arruda, L.V., Barbosa-Póvoa, A.P., Relvas, S., 2010. An operational scheduling model to product distribution through a pipeline network. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 49, 5661–5682.
- Boussaïd, I., Lepagnot, J., Siarry, P., 2013. A survey on optimization metaheuristics. *Information sciences* 237, 82–117.
- Cafaro, D.C., Cerdá, J., 2012. Rigorous scheduling of mesh-structure refined petroleum pipeline networks. *Computers & Chemical Engineering* 38, 185–203.
- Cafaro, D.C., Cerdá, J., 2011. A rigorous mathematical formulation for the scheduling of tree-structure pipeline networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 50, 5064–5085.
- Cafaro, D.C., Cerdá, J., 2010. Operational scheduling of refined products pipeline networks with simultaneous batch injections. *Computers & Chemical Engineering* 34, 1687–1704.
- Cafaro, D.C., Cerdá, J., 2009. Optimal scheduling of refined products pipelines with multiple sources. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 48, 6675–6689.

- Cafaro, D.C., Cerdá, J., 2008. Efficient tool for the scheduling of multiproduct pipelines and terminal operations. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 47, 9941–9956.
- Cafaro, D.C., Cerdá, J., 2004. Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete MILP formulation. *Computers & chemical engineering* 28, 2053–2068.
- Cafaro, V.G., Cafaro, D.C., Méndez, C.A., Cerdá, J., 2015. Optimization model for the detailed scheduling of multi-source pipelines. *Computers & Industrial Engineering* 88, 395–409.
- Cafaro, V.G., Cafaro, D.C., Méndez, C.A., Cerdá, J., 2011. Detailed scheduling of operations in single-source refined products pipelines. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 50, 6240–6259.
- Castro, P.M., Mostafaei, H., 2018. Batch-centric scheduling formulation for treelike pipeline systems with forbidden product sequences. *Computers & Chemical Engineering* 122, 2–18.
- Dantzig, D., 1947. General procedures of empirical science. *Synthese* 5, 441–455.
- Dantzig, G.B., 1990. Origins of the simplex method, in: *A History of Scientific Computing*. pp. 141–151.
- Dantzig, G.B., 1983. Reminiscences about the origins of linear programming, in: *Mathematical Programming the State of the Art*. Springer, pp. 78–86.
- de la Cruz, J.M., de Andres-Toro, B., Herrán, A., Porta, E.B., Blanco, P.F., 2003. Multiobjective optimization of the transport in oil pipelines networks, in: *EFTA 2003. 2003 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. Proceedings (Cat. No. 03TH8696). IEEE, pp. 566–573.
- de la Cruz, J.M., Herrán-González, A., Risco-Martín, J.L., Andrés-Toro, B., 2005. Hybrid heuristic and mathematical programming in oil pipelines networks: Use of immigrants. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A* 6, 9–19.
- de Souza Filho, E.M., Bahiense, L., Ferreira Filho, V.J.M., 2013. Scheduling a multi-product pipeline network. *Computers & chemical engineering* 53, 55–69.
- Dimas, D., Murata, V.V., Neiro, S.M., Relvas, S., Barbosa-Póvoa, A.P., 2018. Multiproduct pipeline scheduling integrating for inbound and outbound inventory management. *Computers & Chemical Engineering* 115, 377–396.
- Dobson, G., 1992. The cyclic lot scheduling problem with sequence-dependent setups. *Operations Research* 40, 736–749.
- Feo, T.A., Resende, M.G., 1995. Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of global optimization* 6, 109–133.
- Feo, T.A., Resende, M.G., 1989. A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations research letters* 8, 67–71.
- Foulds, L.R., 1983. The heuristic problem-solving approach. *Journal of the Operational Research Society* 34, 927–934.
- Foulds, L.R., Partovi, F.Y., 1998. Integrating the analytic hierarchy process and graph theory to model facilities layout. *Annals of Operations Research* 82, 219–232.
- García-Sánchez, Á., Arreche, L.M., Ortega-Mier, M., 2008. Combining simulation and tabu search for oil-derivatives pipeline scheduling, in: *Metaheuristics for Scheduling in Industrial and Manufacturing Applications*. Springer, pp. 301–325.

- Glover, F., 1986. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research* 13, 533–549.
- Graedel, T.E., Erdmann, L., 2012. Will metal scarcity impede routine industrial use? *MRS bulletin* 37, 325–331.
- Hane, C.A., Ratliff, H.D., 1995. Sequencing inputs to multi-commodity pipelines. *Annals of operations research* 57, 73–101.
- Herrán, A., de la Cruz, J.M., De Andrés, B., 2010. A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system. *Computers & chemical engineering* 34, 401–413.
- Holland John, H., 1975. *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Hulse, J.H., 1995. *Science, agriculture, and food security*. NRC Research Press.
- Karmarkar, N., 1984. A new polynomial-time algorithm for linear programming, in: *Proceedings of the Sixteenth Annual ACM Symposium on Theory of Computing*. pp. 302–311.
- Kirschstein, T., 2018. Planning of multi-product pipelines by economic lot scheduling models. *European Journal of Operational Research* 264, 327–339.
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H., Fischer-Kowalski, M., 2009. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological economics* 68, 2696–2705.
- Lewin, K., 1947. *Frontiers in group dynamics: II. Channels of group life; social planning and action research*. *Human relations* 1, 143–153.
- Li, Z., Liang, Y., Liao, Q., Zhang, B., Zhang, H., 2021. A review of multiproduct pipeline scheduling: From bibliometric analysis to research framework and future research directions. *Journal of Pipeline Science and Engineering*.
- Liao, Q., Castro, P.M., Liang, Y., Zhang, H., 2019a. Batch-centric model for scheduling straight multisource pipelines. *AIChE Journal* 65, e16712.
- Liao, Q., Castro, P.M., Liang, Y., Zhang, H., 2019b. Computationally efficient MILP model for scheduling a branched multiproduct pipeline system. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 58, 5236–5251.
- Liao, Q., Castro, P.M., Liang, Y., Zhang, H., 2019c. New batch-centric model for detailed scheduling and inventory management of mesh pipeline networks. *Computers & Chemical Engineering* 130, 106568.
- Liao, Q., Liang, Y., Xu, N., Zhang, H., Wang, J., Zhou, X., 2018a. An MILP approach for detailed scheduling of multi-product pipeline in pressure control mode. *Chemical Engineering Research and Design* 136, 620–637.
- Liao, Q., Zhang, H., Wang, Y., Zhang, W., Liang, Y., 2018b. Heuristic method for detailed scheduling of branched multiproduct pipeline networks. *Chemical Engineering Research and Design* 140, 82–101.
- Lopes, T.M.T., Ciré, A.A., de Souza, C.C., Moura, A.V., 2010. A hybrid model for a multiproduct pipeline planning and scheduling problem. *Constraints* 15, 151–189.
- Lopez, M.A.N., Kingsman, B.G., 1991. The economic lot scheduling problem: theory and practice. *International Journal of Production Economics* 23, 147–164.

- Magatão, L., Arruda, L.V., Neves Jr, F., 2004. A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline. *Computers & chemical engineering* 28, 171–185.
- Magatão, L., Arruda, L.V., Neves-Jr, F., 2011. A combined CLP-MILP approach for scheduling commodities in a pipeline. *Journal of Scheduling* 14, 57–87.
- Magatão, S.N.B., Magatão, L., Luis Polli, H., Neves Jr, 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 & engineering chemistry research* 51, 4591–4609.
- Magatão, S.N.B., Magatão, L., Neves-Jr, F., Arruda, L.V.R., 2015. Novel MILP decomposition approach for scheduling product distribution through a pipeline network. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 54, 5077–5095.
- Mason, L., Prior, T., Mudd, G., Giurco, D., 2011. Availability, addiction and alternatives: three criteria for assessing the impact of peak minerals on society. *Journal of Cleaner Production* 19, 958–966.
- MirHassani, S.A., Abbasi, M., Moradi, S., 2013. Operational scheduling of refined product pipeline with dual purpose depots. *Applied Mathematical Modelling* 37, 5723–5742.
- MirHassani, S.A., BeheshtiAsl, N., 2013. A heuristic batch sequencing for multiproduct pipelines. *Computers & chemical engineering* 56, 58–67.
- MirHassani, S.A., Ghorbanalizadeh, M., 2008. The multi-product pipeline scheduling system. *Computers & Mathematics with Applications* 56, 891–897.
- MirHassani, S.A., Jahromi, H.F., 2011. Scheduling multi-product tree-structure pipelines. *Computers & chemical engineering* 35, 165–176.
- Moradi, S., MirHassani, S.A., 2016. Robust scheduling for multi-product pipelines under demand uncertainty. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 87, 2541–2549.
- Moradi, S., MirHassani, S.A., 2015. Transportation planning for petroleum products and integrated inventory management. *Applied Mathematical Modelling* 39, 7630–7642.
- 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*. Elsevier, pp. 691–696.
- Mostafaei, H., Castro, P.M., Ghaffari-Hadigheh, A., 2015. A novel monolithic MILP framework for lot-sizing and scheduling of multiproduct treelike pipeline networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 54, 9202–9221.
- Moura, A.V., de Souza, C.C., Cire, A.A., Lopes, T.M., 2008. Heuristics and constraint programming hybridizations for a real pipeline planning and scheduling problem, in: *2008 11th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering*. IEEE, pp. 455–462.
- Neves-Jr, F., Magatão, L., Stebel, S.L., Boschetto, S.N., Felizari, L.C., Czaikowski, D.I., Rocha, R., Ribas, P.C., 2007. An efficient approach to the operational scheduling of a real-world pipeline network, in: *Computer Aided Chemical Engineering*. Elsevier, pp. 697–702.
- Osman, I.H., Kelly, J.P., 1996. Meta-heuristics: an overview. *Meta-heuristics* 1–21.

- Pereira, B.C., 2008. Programação de transferência de derivados de petróleo em rede dutoviária: uma análise exata via branch-and-bound (PhD Thesis). Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia de Produção, COPPE-UFRJ
- Puchinger, J., Raidl, G.R., 2005. Combining metaheuristics and exact algorithms in combinatorial optimization: A survey and classification, in: International Work-Conference on the Interplay between Natural and Artificial Computation. Springer, pp. 41–53.
- Rejowski Jr, R., Pinto, J.M., 2003. Scheduling of a multiproduct pipeline system. *Computers & Chemical Engineering* 27, 1229–1246.
- Relvas, S., Barbosa-Póvoa, A.P.F., Matos, H.A., 2009. Heuristic batch sequencing on a multiproduct oil distribution system. *Computers & Chemical Engineering* 33, 712–730.
- Relvas, S., Magatão, S.N.B., Barbosa-Póvoa, A.P.F., Neves Jr, F., 2013. Integrated scheduling and inventory management of an oil products distribution system. *Omega* 41, 955–968.
- Relvas, S., Matos, H.A., Barbosa-Póvoa, A.P.F., Fialho, J., 2007. Reactive scheduling framework for a multiproduct pipeline with inventory management. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 46, 5659–5672.
- Relvas, S., Matos, H.A., Barbosa-Póvoa, A.P.F., Fialho, J., Pinheiro, A.S., 2006. Pipeline scheduling and inventory management of a multiproduct distribution oil system. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 45, 7841–7855.
- Ribas, P.C., Yamamoto, L., Polli, H.L., Arruda, L.V., Neves-Jr, F., 2013. A micro-genetic algorithm for multi-objective scheduling of a real world pipeline network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 26, 302–313.
- Rossi, F., Van Beek, P., Walsh, T., 2008. Constraint programming. *Foundations of Artificial Intelligence* 3, 181–211.
- Sasikumar, M., Prakash, P.R., Patil, S.M., Ramani, S., 1997. PIPES: A heuristic search model for pipeline schedule generation. *Knowledge-Based Systems* 10, 169–175.
- Shah, N., 1996. Mathematical programming techniques for crude oil scheduling. *Computers & Chemical Engineering* 20, S1227–S1232.
- 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* 1–27.
- Vidal, O., Goffé, B., Arndt, N., 2013. Metals for a low-carbon society. *Nature Geoscience* 6, 894–896.
- Zaghian, A., Mostafaei, H., 2016. An MILP model for scheduling the operation of a refined petroleum products distribution system. *Operational Research* 16, 513–542.

Annexes

Annexe 1 : Liste de quelques exportateurs pour le produit 2510 : Phosphates de calcium et phosphates aluminocalciques, naturels, et craies phosphatées (<https://www.trademap.org>)

Sources : Calculs de l'ITC basés sur les statistiques de UN COMTRADE et de l'ITC.

L'agrégation mondiale représente la somme de pays rapporteurs et non rapporteurs

Les données basées sur les données rapportées par les partenaires (données miroir) sont affichées en orange.

Unité : Dollar Américain milliers

| Exportateurs | Valeur exportée en 2017 | Valeur exportée en 2018 | Valeur exportée en 2019 | Valeur exportée en 2020 | Valeur exportée en 2021 |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Monde | 2 313 330 | 2 377 588 | 2 354 090 | 2 200 216 | 3 051 721 |
| Maroc | 862 979 | 884 162 | 760 462 | 773 549 | 994 759 |
| Jordanie | 375 733 | 368 694 | 373 261 | 342 815 | 637 900 |
| Pérou | 206 808 | 218 066 | 235 389 | 192 794 | 298 007 |
| Russie, Fédération de | 339 416 | 320 248 | 329 971 | 255 816 | 292 621 |
| Egypte | 160 199 | 154 316 | 174 117 | 219 452 | 195 512 |
| Algérie | 55 134 | 92 755 | 94 855 | 71 735 | 147 227 |
| Togo | 68 176 | 83 238 | 78 333 | 86 034 | 129 192 |
| République arabe syrienne | 2 061 | 30 993 | 22 014 | 44 679 | 65 334 |
| Kazakhstan | 41 766 | 42 591 | 44 481 | 39 559 | 57 644 |
| Sénégal | 31 757 | 29 156 | 38 116 | 19 997 | 39 774 |
| Chine | 45 246 | 42 322 | 33 877 | 37 718 | 38 691 |
| Nauru | 18 813 | 8 209 | 10 090 | 12 510 | 37 415 |
| Emirats arabes unis | 1 | 4 | 0 | 25 | 32 529 |
| Israël | 51 917 | 33 231 | 50 524 | 46 455 | 23 857 |
| Viet Nam | 4 615 | 8 392 | 8 862 | 6 422 | 14 630 |
| Pays-Bas | 13 690 | 12 095 | 16 921 | 16 302 | 13 650 |
| Finlande | 7 883 | 7 096 | 9 749 | 7 960 | 8 626 |
| Île Christmas | 12 042 | 10 986 | 6 703 | 1 300 | 5 586 |
| Ouzbékistan | 1 184 | 2 897 | 3 271 | 4 742 | 5 276 |
| Belgique | 2 640 | 2 575 | 2 367 | 2 473 | 3 228 |
| Autriche | 155 | 3 481 | 1 708 | 1 990 | 2 012 |
| Italie | 437 | 1 026 | 1 263 | 1 286 | 1 729 |
| Pakistan | 1 304 | 1 470 | 1 903 | 1 925 | 1 409 |

