



Institut National de Statistique
et d'Economie Appliquée



Centre des Etudes Doctorales
Sciences, Ingénierie
et Développement Durable

Avis de soutenance de thèse de Doctorat

Monsieur Oualid Ben Brik

Doctorant au laboratoire de recherche

« Systèmes d'Information, Systèmes Intelligents et Modélisation Mathématique »
(SI2M)

Spécialité : Mathématiques Appliquées

Soutiendra publiquement sa thèse de Doctorat

Le vendredi **11 juillet 2025 à 15h00**

à la salle de conférence de l'INSEA

Intitulé de la thèse

« Optimization Methods for Efficient Reclaimer Scheduling and Conflict-Free
Operations in Dry Bulk Terminals »

Devant le jury composé de :

Président :

Pr. Adil KABBAJ, PES, INSEA-Rabat

Directeur de thèse :

Pr. Rachid BENMANSOUR, PH, INSEA-Rabat

Membres du jury :

Pr. Abdeslam KADRANI, PES, INSEA de Rabat, Maroc

Pr. Maria LEBBAR, PES, ENSMR (ex ENIM) de Rabat, Maroc

Pr. Nicolas ZUFFEREY, PES, École Polytechnique de Lausanne, UPFL, Genève

Pr. Said HANAFI, PES, Université Polytechnique Hauts-de-France (UPHF), France

Date :

Réservé à l'administration

N° de thèse :

Nom : BEN BRIK

Prénom : Oualid

Abstract

The integration of sophisticated optimization techniques is crucial for managing complex industrial systems, especially in bulk material handling. In bulk ports, which are key to logistics but less studied than container terminals, reclaimer scheduling is a significant challenge. These machines are responsible for reclaiming dry bulk materials from stockpiles in the stockyard and transferring them to ship-loaders for vessel loading via conveyor belts. Reclaimer efficiency affects material throughput, resource utilization and overall port productivity. The aim of this thesis is to address the Reclaimer Scheduling Problem (RSP) by developing a planning framework to route these interconnected machines, assign reclamation jobs to machines, and sequence operations optimally. Although related to identical parallel machine scheduling, the Vehicle Routing Problem (VRP) and the multiple Traveling Salesman Problem (mTSP), the RSP adds sequence-dependent setup times, modeling travel between stockpiles, and layout-driven eligibility constraints that confine rail-mounted, pivoting-boom reclaimers to adjacent stockpiles. Finally, the model is extended to include Preventive Maintenance (PM), which improves equipment reliability and minimizes downtime.

Our contributions are threefold. First, we investigate the RSP within a dry bulk export terminal context by considering a variable number of stockpiles per stockpad, a practical consideration often neglected in previous studies. To this end, we propose a novel Mixed Integer Linear Programming (MILP) model based on a One-Commodity Formulation (OCF) and effectively captures key operational constraints. Furthermore, to address the compounded *NP*-hard complexity, we have developed three innovative greedy heuristic algorithms, PAGH, SAGH, and PSAGH, as well as a GVNS metaheuristic, all of which yield high-quality solutions for

Les Résumés de la thèse (F1)

large-scale instances. Second, we extend the RSP framework by integrating periodic preventive maintenance through new MILP formulations and heuristic strategies that address maintenance and scheduling concurrently. Our approach is validated on two configurations of dry bulk export terminals, one with two stockpads and one reclaimer, and a more complex scenario with three stockpads and two reclaimers, using a greedy constructive heuristic refined by a customized GVNS metaheuristic. Third, we address the conflict-free routing and scheduling of multiple reclaimers in complex stockyard environments. This extension introduces a novel MILP formulation and a HIG algorithm, initialized with solutions from our constructive greedy heuristic (FCGCH), to tackle challenges such as machine heterogeneity, non-overlapping stockpiles, and non-crossing constraints.

To validate the proposed methods, a series of extensive computational experiments were conducted using benchmark instances derived from real-world operations. The results highlight significant improvements in solution quality and computational efficiency, particularly for large-scale industrial settings.

Keywords: Reclaimer Scheduling, Bulk Ports, Sequence-Dependent Setup Times, Machine Eligibility Constraints, Preventive Maintenance, Mixed-Integer Programming, General Variable Neighborhood Search, Hybrid Iterated Greedy, Greedy Heuristics, Conflict-Free Operations.

Résumé

L'intégration de techniques d'optimisation sophistiquées est cruciale pour la gestion de systèmes industriels complexes, en particulier dans la manutention des matériaux en vrac. Dans les ports de vrac, qui sont essentiels à la logistique mais moins étudiés que les terminaux à conteneurs, la planification des récupérateurs est un défi important. Ces machines sont responsables de la récupération des matériaux en vrac secs des stocks dans la zone de stockage et de leur transfert vers les chargeurs de navires pour le chargement des navires via des bandes transporteuses. L'efficacité des récupérateurs affecte le débit des matériaux, l'utilisation des ressources et la productivité globale du port. L'objectif de cette thèse est de traiter le Problème de Planification des Récupérateurs (RSP) en développant un cadre de planification pour acheminer ces machines interconnectées, assigner les tâches de récupération aux machines et séquencer les opérations de manière optimale. Bien que lié à la planification de machines parallèles identiques, au VRP et au mTSP, le RSP ajoute des temps de préparation dépendant de la séquence, modélisant les déplacements entre les tas de matériaux, et des contraintes d'éligibilité dictées par la disposition qui confinent les récupérateurs montés sur rails avec bras pivotant aux tas adjacents. Enfin, le modèle est étendu pour inclure la maintenance préventive (PM), ce qui améliore la fiabilité de l'équipement et minimise les temps d'arrêt.

Nos contributions sont triples. Premièrement, nous étudions le RSP dans le contexte d'un terminal d'exportation de vrac sec en considérant un nombre variable de tas de matériaux par zone de stockage, une considération pratique souvent négligée dans les études précédentes. À cette fin, nous proposons un nouveau modèle de Programmation Linéaire Mixte en Nombres Entiers (MILP) basé sur une OCF qui capture efficacement les contraintes opérationnelles clés. De plus, pour aborder la complexité NP-difficile, nous avons développé trois algorithmes heuristiques gloutons innovants, PAGH, SAGH et PSAGH, ainsi qu'une métaheuristique Recherche à Voisinage Variable Générale (GVNS), qui fournissent tous des solutions de haute qualité pour des instances de grande taille. Deuxièmement, nous étendons le cadre du RSP en intégrant la maintenance préventive périodique à travers de nouvelles formulations MILP et des stratégies heuristiques qui traitent la maintenance et la planification simultanément. Notre approche est validée sur deux configurations de terminaux d'exportation de vrac sec, l'une avec deux zones de stockage et un récupérateur, et un scénario plus complexe avec trois zones de

Les Résumés de la thèse (F1)

stockage et deux récupérateurs, en utilisant une heuristique constructive gloutonne affinée par une métaheuristique GVNS. Troisièmement, nous abordons le routage et la planification sans conflit de multiples récupérateurs dans des environnements de zone de stockage complexes. Cette extension introduit une nouvelle formulation MILP et un algorithme Glouton Itéré Hybride (HIG), initialisé avec des solutions de notre heuristique gloutonne constructive (FCGCH), pour relever des défis tels que l'hétérogénéité des machines, les stocks non chevauchants et les contraintes de non-croisement.

Pour valider les méthodes proposées, une série d'expériences computationnelles approfondies ont été menées en utilisant des instances de référence dérivées d'opérations réelles. Les résultats mettent en évidence des améliorations significatives en termes de qualité de solution et d'efficacité computationnelle, en particulier pour les environnements industriels à grande échelle.

Mots-clés : Planification des récupérateurs, Ports de vrac, Temps de préparation dépendant de la séquence, Contraintes d'éligibilité des machines, Maintenance préventive, Programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP), Recherche à voisinage variable générale (GVNS), Glouton itéré hybride (HIG), Heuristiques gloutonnes, Opérations sans conflit.



ملخص

يعد دمج تقنيات التحسين المتقدمة أمرًا بالغ الأهمية لإدارة الأنظمة الصناعية المعقدة، خاصة في مناولة المواد السائبة. في موانئ السوانب، التي تعتبر أساسية للخدمات اللوجستية ولكنها أقل دراسة من محطات الحاويات، تمثل جدولة آلات استعادة المواد السائبة تحديًا كبيرًا. هذه الآلات مسؤولة عن استخلاص المواد السائبة الجافة من أكوام التخزين في ساحة التخزين ونقلها إلى أجهزة تحميل السفن لتحميلها على متن السفن عبر أحزمة ناقلية. تؤثر كفاءة آلات الاستخلاص على إنتاجية المواد، واستخدام الموارد وإنتاجية الميناء بشكل عام. الهدف من هذه الأطروحة هو معالجة مشكلة جدولة أجهزة الاستخلاص (RSP) من خلال تطوير إطار تخطيط لتوجيه هذه الآلات المترابطة، وتعيين مهام الاستخلاص إلى الآلات، وتسلسل العمليات على النحو الأمثل. على الرغم من ارتباطها بجدولة الآلات المتوازية المتماثلة، وVRP وmTSP، إلا أن RSP يضيف توقيت الإعداد المعتمد على التسلسل، ونمذجة الانتقال بين أكوام التخزين، وقيود الأهلية التي يحركها التخطيط والتي تحصر آلات الاستخلاص المثبتة على سكة حديدية وذراع محوري في أكوام التخزين المتجاورة. وأخيرًا، يتم توسيع النموذج ليشمل الصيانة الوقائية (PM)، مما يحسن موثوقية المعدات ويقلل من وقت حدوث الأعطال.

تتمثل مساهمتنا في ثلاثة جوانب. أولاً، نبحث في مشكلة RSP في سياق الموانئ الجافة لتصدير السوانب من خلال النظر في عدد متغير من أكوام التخزين لكل رصيف تخزين، وهو أمر غالبًا ما يتم إهماله في الدراسات السابقة. وتحقيقًا لهذه الغاية، نقترح نموذجًا جديدًا للبرمجة الخطية ذات الأعداد الصحيحة المختلطة (MILP) يستند إلى صيغة OCF ويجسد القيود العملية الرئيسية بشكل فعال. كما قمنا، لمواجهة التعقيد الكبير من نوع NP-difficile، بتطوير ثلاث خوارزميات مبتكرة: PSAGH، SAGH، PAGH، بالإضافة إلى خوارزمية البحث العام متغير الجوار (GVNS)، والتي تنتج جميعها حلولاً عالية الجودة للحالات الكبيرة. ثانيًا، قمنا بتوسيع إطار RSP من خلال نماذج MILP جديدة واستراتيجيات إرشادية تتعامل مع الجدولة والصيانة بشكل متكامل. تم التحقق من صحة نهجنا على تصميمين لمرفأين لتصدير المواد السائبة الجافة، أحدهما يحتوي على اثنين من منصات التخزين وجهاز استخلاص واحد، وسيناريو أكثر تعقيدًا مع ثلاث منصات تخزين وجهازين للاستخلاص، باستخدام خوارزمية بناءية محسنة عبر GVNS مصممة خصيصًا. ثالثًا، نتطرق إلى مسألة التوجيه والجدولة الخالية من التعارض للعديد من أجهزة الاستخلاص في بيئات ساحات التخزين المعقدة. يقدم هذا الامتداد صياغة جديدة لـ MILP وخوارزمية HIG، التي تمت استهلاكها بحلول من خوارزمتنا (FCGCH)، لمعالجة تحديات مثل عدم تماثل الآلات، وأكوام التخزين الغير متداخلة، والقيود الغير متقاطعة.



INSEA
Institut National de
Statistique et d'Économie
Appliquée
CEDOC-SIDD

Les Résumés de la thèse (F1)

وللتحقق من صحة المناهج المقترحة، أجرينا سلسلة من التجارب الحسابية المكثفة باستخدام حالات مرجعية مستمدة من عمليات واقعية. وقد أظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً من حيث جودة الحلول والكفاءة الحسابية، لا سيما في البيئات الصناعية واسعة النطاق.

الكلمات المفتاحية: جدولة آلات الاستعادة، موائى البضائع السائبة، أزمنة الإعداد المعتمدة على التتابع، قيود أهلية الآلات، الصيانة الوقائية، البرمجة الخطية ذات الأعداد الصحيحة المختلطة، خوارزمية البحث العام متغير الجوار، خوارزمية جشعة مكررة هجينة، خوارزمية جشعة، العمليات الخالية من التعارض.