



N° d'ordre NNT : 2022LYO20058

THÈSE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ LUMIÈRE LYON 2 en
COTUTELLE AVEC L'UNIVERSITÉ de CHIANG MAI

École Doctorale : ED 512

Informatique et Mathématiques

Discipline : Informatique

Soutenue publiquement le 26 octobre 2022, par :

Siraprapa WATTANAKUL

**Digital twin for the decision making to
manage port operation with uncertainties.**

An approach based on knowledge from machine learning.

Devant le jury composé de :

Nopasit CHAKPITAK, Professeur des Universités, Université de Chang Mai, Président

Gulgun ALPAN-GAUJAL, Professeure des Universités, Université Grenoble Alpes, Rapporteur

Punnarumol TEMDEE, Associate Professor, Mae Fah Luang University, Rapporteur

Sébastien HENRY, Maître de conférences, Université Claude Bernard Lyon 1, Examineur

Keshav DAHAL, Professeur des Universités, Université of the West Scotland, Examineur

Ratapol WUDHIKARN, Professeur des Universités, Université de Chang Mai, Examineur

Napaporn REEVEERAKUL, Maître de conférences, Université de Chang Mai, Directeur de thèse

Yacine OUZROUT, Professeur des Universités, Université Lumière Lyon 2, Directeur de thèse

Contrat de diffusion

Ce document est diffusé sous le contrat *Creative Commons* « [Paternité – pas d'utilisation commerciale - pas de modification](#) » : vous êtes libre de le reproduire, de le distribuer et de le communiquer au public à condition d'en mentionner le nom de l'auteur et de ne pas le modifier, le transformer, l'adapter ni l'utiliser à des fins commerciales.

Résumé long en français, max 4 pages

Maillon essentiel du commerce, le trafic mondial de conteneurs maritimes a augmenté chaque année durant la décennie 2010-2019 en raison de la demande du marché avec une augmentation variant de 1,6% à 7,7% par an. En 2019, le trafic de conteneurs a atteint 811 millions de TEUs (unité équivalente à des conteneurs de vingt pieds). En 2020, la pandémie de coronavirus (COVID-19) a entraîné plusieurs changements affectant le transport maritime au niveau mondial. Les tensions économiques ont poussé les échanges commerciaux vers d'autres marchés et fournisseurs que la Chine, par exemple les pays d'Asie du Sud-Est. Ensuite, les flux de conteneurs ont été modifiés en conséquence de l'évolution de la demande, ainsi que de la capacité des navires gérés par les armateurs [2]. En outre, les ports ont été directement touchés par la pandémie [5]. Mais d'autres événements majeurs peuvent toucher les ports comme les graves intempéries qui ont frappées les ports britanniques [6]. La pandémie et les facteurs supplémentaires de congestion tels que les intempéries et les événements imprévus (grèves) ont contribué directement et indirectement à la congestion des opérations portuaires pendant la période de pandémie [7]. Ces changements sont un exemple d'incertitude sur la demande de fret maritime. En outre, il existe d'autres types d'incertitudes, comme les pannes d'équipements portuaires (grue, camion, etc), la dépendance à l'égard des opérations des partenaires et d'autres événements. Leurs effets se répercutent sur les opérations adjacentes ou en aval, notamment sur les ports de fret maritime. Parmi les acteurs de la chaîne d'approvisionnement mondiale, le port de fret maritime est le point d'échange des conteneurs entre plusieurs moyens de transport et plusieurs acteurs (camions, trains, barges locales, navires, etc.). Le port est le nœud qui est impacté par les incertitudes de divers acteurs externes, mais il est aussi le nœud qui a le potentiel de limiter l'impact de ces incertitudes afin de maintenir les performances de la chaîne logistique.

Les opérations portuaires sont complexes. Le système implique trois flux de conteneurs reliés par l'interdépendance du partage de ressources. Lorsqu'un conteneur détient une ressource, les autres conteneurs du même flux ou du flux connexe doivent attendre. Le temps d'attente des ressources influence les performances de tous les flux de conteneurs. En particulier, lorsque le port est affecté par des perturbations et des incertitudes externes et internes, les performances de la logistique des conteneurs sur le port peuvent se dégrader en raison de l'interdépendance des opérations. Face à la complexité du système opérationnel, le domaine de la planification des ressources portuaires met en exergue toute la difficulté à faire face aux incertitudes pour le pilotage des opérations portuaires.

Classiquement et selon la gestion des flux portuaires proposé par [1], un port est séparé en trois zones : zone des opérations portuaires de chargement/déchargement des navires (the seaside), zone de stockage temporaire du terminal (the yard) et la zone des opérations terrestres pour l'interconnexion avec les autres modes de transport terrestre (the hinterland). L'approche définit la planification des opérations dans chaque zone portuaire en fonction des capacités fixées au niveau stratégique et par l'implantation des ressources matérielles dans chaque zone. En fonction de la configuration de chaque port, les flux des opérations seront différents ainsi que les caractéristiques des opérations, et notamment leur durée. En revanche, la planification des opérations de chaque port se fait généralement selon une séquence et une dépendance identique ou similaire définie dans l'approche proposée par [1].

La résilience aux incertitudes et aux changements est devenue un élément clé de l'industrie [2]. La chaîne d'approvisionnement mondiale est constituée de divers types d'événements à risque tels que la devise, la variabilité du temps de transit, la précision des prévisions, la dépendance, etc. Par ailleurs, ces risques sont liés les uns aux autres dans des schémas complexes. Par exemple, une erreur de prévision sur le délai d'une opération entraîne une perte et la direction a tendance à réagir de manière excessive dans le plan suivant, ce qui entraîne une surconsommation de ressources. Le temps de

transit de transport et la précision des prévisions figurent parmi les principaux risques pris en compte par les gestionnaires de la chaîne d'approvisionnement mondiale en raison de la grande variabilité du délai d'exécution des opérations [3].

Il est extrêmement complexe de spécifier tous les facteurs relatifs au délai d'exécution des opérations, en particulier dans les ports. Les compagnies maritimes estiment que 90 % des sources de non-fiabilité de leur calendrier relève du temps d'attente et de variation de la productivité des ports [4]. D'autre part, les armateurs exercent également une influence sur la variabilité des délais de rotation. Le port est le nœud de l'échange de conteneurs entre les modes de transport, tant du côté mer que terrestre, et il sert d'interface à divers opérateurs de services logistiques dans un contexte intermodal. Chaque acteur a un objectif différent en ce qui concerne le respect du calendrier, certains étant orientés vers la fiabilité tandis que d'autres sont plus focalisés sur les retards. Par conséquent, le port doit gérer non seulement les conteneurs avec ces acteurs, mais aussi les facteurs d'incertitude qui font que l'opération réelle ne peut pas être réalisée comme prévu. En plus des incertitudes externes, le port doit faire face à ces propres incertitudes internes.

Les approches proposées dans la littérature n'intègrent que certaines parties des incertitudes. La connaissance actuelle des incertitudes utilisée dans les modèles d'allocation des quais est basée uniquement sur les statistiques d'un port, sans tenir compte de l'interdépendance des ports et de tous les acteurs du fret maritime, voire de la chaîne logistique en général. Par ailleurs, l'impact d'une incertitude se limite très rarement à une seule opération. L'ampleur des incertitudes évolue au cours du temps en fonction du déplacement des conteneurs dans la chaîne des opérations portuaires. Par conséquent, afin de quantifier l'impact des incertitudes sur la chaîne d'opérations portuaires, la connaissance de l'incertitude dans les changements dynamiques ayant un impact sur chaque opération du port doit être captée.

En raison de la limitation sur les données disponibles et du manque de connaissance pour disposer d'information sur les incertitudes pour la gestion des opérations portuaires, nous proposons une approche globale basée sur un jumeau numérique d'un terminal portuaire de conteneurs. Le jumeau numérique a pour objectif principal de reproduire le port en intégrant les incertitudes dans les données opérationnelles pour ensuite construire la base de connaissances afin de soutenir la décision du responsable des opérations portuaires. Cette approche se compose de 3 étapes principales. Premièrement, la construction de la structure du jumeau numérique avec ses différents composants et leur comportement individuel. Cette première étape se termine par la calibration du comportement des composants virtuels à partir de données réelles issues d'un port et des données en accès libre sur les mouvements des navires. Deuxièmement, l'utilisation du jumeau numérique avec le comportement réel de chaque composant afin de générer un volume de données suffisant pour la troisième étape. Ces données générées à partir du jumeau numérique sont ensuite exploitées afin de construire un modèle de prédiction de séries temporelles LSTM. Avec des prédictions renouvelées périodiquement, le responsable d'exploitation d'un terminal conteneur visualisera en permanence l'évolution du planning des opérations, notamment les éventuels écarts entre les dates de départ des navires planifiées initialement et celles prédites en fonction des données réelles à l'instant considéré.

Cette thèse se compose de 5 chapitres. Après une introduction générale, elle est organisée comme suit :

Le chapitre 1 présente une description du contexte industriel de cette étude, les opérations portuaires pour le fret de conteneurs et la gestion des ressources. Les problématiques industrielles et scientifiques sont alors mises en évidence (incertitude, traçabilité des données, limitation des connaissances, décision vers l'incertitude...) et les principales questions de recherche sont définies.

Le chapitre 2 dresse un état de l'art en présentant d'abord la méthodologie de l'étude qui est principalement liée : aux connaissances pour traiter l'incertitude opérationnelle, la traçabilité des données dans les chaînes d'approvisionnement, le jumeau numérique et les modèles de prédiction. Les avantages et les limites de certaines approches sont soulignés dans ce chapitre pour introduire et justifier nos contributions.

Le chapitre 3 présente la méthodologie générale de l'approche développée en présentant le cadre conceptuel proposé. Ce cadre définit le jumeau numérique du port et consiste en trois étapes principales : l'identification et la calibration du comportement des briques de base du jumeau numérique, l'utilisation de ce jumeau numérique afin de générer des données et enfin l'extension du jumeau numérique par un modèle comportemental globale obtenue par apprentissage et permettant de prédire les dates de départ des navires. Les différentes étapes de la modélisation du jumeau numérique sont détaillées dans ce chapitre, et des scénarios de validation sont présentés.

Le chapitre 4 présente en détail l'identification et la calibration des briques de base du jumeau numérique. Les opérations portuaires sont décrites et les facteurs d'incertitude détaillés. Le modèle de simulation est calibré en fonction de ces facteurs et validé à l'aide de données réelles. Les résultats de la simulation sont discutés à la fin du chapitre.

Le chapitre 5 aborde le développement de modèle de prédiction basé sur un algorithme de réseau neuronal récurrent (RNN) et l'architecture de mémoire à long terme (LSTM) que nous avons développé. Une première série d'expériences montre que l'inférence proposée est applicable pour l'apprentissage et la prédiction des opérations portuaires. La deuxième série d'expériences montre l'utilisation d'un modèle de prévision de séries temporelles LSTM en plusieurs étapes. Les résultats sont discutés.

Une dernière partie résume les contributions de l'approche proposée. Enfin, ce chapitre met en évidence les défis perspectives à court, moyen et long terme.

[1] Bierwirth Christian, Meisel Frank. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals // *European Journal of Operational Research*. may 2010. 202, 3. 615–627.

[2] UNCTAD . Review of maritime transport : 2020. New York : United Nations Publications, 2020. 1–159.

[3] Manuj Ila, Mentzer John T. Global supply chain risk management strategies // *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*. 2008. 38, 3. 192–223.

[4] Notteboom Theo E. The Time Factor in Liner Shipping Services // *Maritime Economics & Logistics* 2006 8 :1. feb 2006. 8, 1. 19–39.

[5] The Loadstar . Peak season and port congestion surcharges spread to Asian tradelanes. 2020.

[6] The Loadstar . Congestion problems at UK ports stacking up as rising imports drive delays. 2020.

[7] Gui D;, Wang H;, Yu M, Ferrari Claudio, Gui Dongping, Wang Haiyan, Yu Meng. Risk Assessment of Port Congestion Risk during the COVID-19 Pandemic // *Journal of Marine Science and Engineering* 2022, Vol. 10, Page 150. jan 2022. 10, 2. 150.