

# CIGI QUALITA MOSIM 2023

## Transition vers le port intelligent : synthèse des approches méthodologiques

BASMA BELMOUKARI<sup>1</sup>, JEAN-FRANÇOIS AUDY<sup>1,2</sup>, PASCAL FORGET<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Université du Québec à Trois-Rivières  
3351, Boulevard des Forges, Trois-Rivières, G9A5H7, CANADA  
basma.belmoukari@uqtr.ca

<sup>2</sup> Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT)  
jean-francois.audy@uqtr.ca; pascal.forget@uqtr.ca

---

**Résumé** – Les progrès technologiques liés à l'Industrie 4.0 rendent possible la transformation numérique des ports. Pour accompagner et orienter les administrations portuaires dans cette transition vers le port intelligent, les gestionnaires ont besoin d'une feuille de route pour faciliter leurs choix quant aux technologies et solutions d'affaires à privilégier. Plusieurs approches méthodologiques en transformation numérique sont proposées dans la littérature. Le but de cet article est de présenter une revue et une synthèse de ces dernières en vue d'élaborer une feuille de route pour cette transition vers le port intelligent.

**Abstract** – Technological advances related to Industry 4.0 makes possible the digital transformation of ports. To support and guide port authorities in this digital transition to smart port, managers need a roadmap to facilitate their choices regarding preferred technologies and business solutions. Several methodological approaches in digital transformation are proposed in the literature. The purpose of this article is to present a review and a synthesis of these in order to develop a roadmap for this transition to the smart port.

**Mots clés** - port intelligent, Industrie 4.0, transformation numérique.

**Keywords** – Smart port, Industry 4.0, Digital transformation

---

### 1 INTRODUCTION

Le rapport annuel de la CNUCED en 2019 estime que le transport de marchandises augmentera de 60 % à l'horizon de 2050 suite à la mondialisation et l'évolution de l'Industrie 4.0 [UNCTAD, 2019]. Également, les exigences clients sont en évolution continue et la concurrence entre les ports est devenue acharnée [Belmoukari et al., 2023]. D'un autre côté, les changements climatiques, les conventions FAL (*Facilitation Committee*) de l'Organisation maritime internationale et les réglementations internationales incitent les organisations portuaires à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et à favoriser la protection de l'environnement [Boullauzan et al., 2022]. Ces facteurs représentent les enjeux actuels et futurs du port maritime [Belmoukari et al., 2023; Jeevan et al., 2022]. Pour faire face à ces enjeux, les administrations portuaires doivent être modernes et effectuer une transition vers le concept de port intelligent (*smart port*) [Belmoukari et al., 2023; Heilig et al., 2017; Molavi et al., 2020]. Cette transition vers une transformation numérique est une obligation pour que le port puisse garantir sa pérennité et être compétitif [Belmoukari et al., 2023; Karas, 2020]. Il permettra aussi d'accroître son efficacité et sa performance [Sakti, 2016, Karas, 2020], d'augmenter sa sûreté et sécurité [Molavi et al., 2020] et d'assurer une gestion optimale des flux et trafic [Min, 2022]. Le port intelligent repose essentiellement sur l'investissement dans de nouvelles technologies [do Nascimento Dominguez et al., 2022] et la mise en place des stratégies et pratiques managériales intelligentes [Belmoukari et al., 2023; Boullauzan et al., 2022]. Selon le Forum économique mondial, dans leur rapport émis pour l'année 2015-2016, la transformation numérique est très rentable. Ils estiment que 1 USD investi dans les données

massives (*big data*) et l'intelligence artificielle (deux technologies issues de l'Industrie 4.0) permettra de générer une augmentation de 90 % des revenus [Lazarevna et al., 2020]. De leur côté, Macaulay et al. [2015] estiment que la mobilisation des nouvelles technologies permettra de générer un gain de 1900 milliards de dollars en 2025 pour l'ensemble de la chaîne logistique. Par exemple, Boullauzan et al., [2022] citent que la numérisation des documents commerciaux au port de Singapour a permis de réduire le temps de traitement allant de 4 jours à 4 heures [Boullauzan et al., 2022]. À cet effet, plusieurs États investissent des milliers de dollars pour la numérisation et transformation en port intelligent [Philipp, 2020], comme le gouvernement coréen qui a investi 160 milliards de dollars pour la transformation du port de Pusan en port intelligent [Boullauzan et al., 2022; Jun et al., 2018].

Toutefois, pour assurer une transformation en port intelligent, les administrations portuaires sont limitées en termes de ressources financières, espace et capacité [Scholz-Reiter et al., 2004]. Dans ce contexte de ressources limitées, les administrations portuaires doivent prioriser certaines technologies, solutions innovantes et pratiques managériales selon leur impact sur la performance de leur organisation. Elles doivent trouver un juste milieu entre les investissements, les ressources déployées et les objectifs visés [Mouagni, 2018], afin d'éviter des équipements et technologies non ou sous exploités en raison de leur incapacité à attirer de nouveaux utilisateurs [Adolf & Liu, 2014]. Pour ce faire, les administrations portuaires ont besoin d'une feuille de route pour les orienter et les accompagner pour un choix avisé des technologies et pratiques selon leurs ressources disponibles et impacts escomptés [Triska et al., 2022].

Cependant, il existe un manque d'approches méthodologiques pour décrire et mesurer le processus de transformation numérique des ports [Philipp, 2020]. Malgré la prise de conscience des avantages de la transformation en port intelligent, il n'existe aucune feuille de route explicite pour réussir cette transformation numérique ou d'un cadre stratégique en matière de numérisation qui permet d'appuyer et d'orienter les décisions de l'administration portuaire lors de la transition vers un port intelligent [Boullauazan et al., 2022]. À cet effet, plusieurs chercheurs recommandent aux administrations portuaires de s'inspirer des bonnes pratiques de l'Industrie 4.0 pour tendre vers le port intelligent [Hofmann & Rüschi, 2017 ; Liao et al., 2017 ; Lu, 2017; Oztemel & Gursev, 2020; Valenciaport, 2020]. Le but de cet article est de proposer, sur la base d'une synthèse des approches recensées, une feuille de route pour la transformation numérique vers le port intelligent.

Afin de combler cette lacune dans la littérature, cet article présente une synthèse des différentes approches méthodologiques en transformation numérique appliquées au domaine manufacturier (Industrie 4.0) et au domaine maritime ainsi qu'une feuille de route vers une transition numérique des ports.

La suite de l'article est divisée en quatre sections. Premièrement, on y décrit la méthodologie de recherche utilisée. Deuxièmement, une revue de la littérature des différentes approches méthodologiques de transformation numérique est présentée. Troisièmement, une synthèse des approches méthodologiques recensées est présentée, suivie de la proposition d'une feuille de route, puis d'une conclusion.

## 2 MÉTHODOLOGIE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de littérature est basée dans un premier temps sur les articles relatifs au secteur maritime. Les mots clés définis sont : « port » ET « feuille de route », « port » ET « *roadmap* », « port » ET « *maturity index* », « port » ET « indice de maturité », « *smart port* » ET « feuille de route » et finalement « *smart port* » ET « indice de maturité ». Ces mots clés ont été utilisés dans les bases de données reconnues ABI, Scopus, EBESCO, JCR, Emerald Insight et Science Direct. Seules les publications évaluées par les pairs et rédigées en langue française et anglaise furent considérées. Dans un second temps, la revue de littérature s'est étendue sur l'Industrie 4.0. Les critères d'inclusion et les bases de données choisies restent les mêmes. Les nouveaux mots clés utilisés sont les suivants : « Industrie 4.0 » ET « feuille de route », « Industrie 4.0 » ET « indice de maturité », « Industry 4.0 » ET « *roadmap* », « Industry 4.0 » ET « *maturity index* ».

L'analyse s'est basée sur le titre de l'article et son résumé. À la suite de cette analyse, 35 articles ont été retenus pour cette revue de littérature.

## 3 REVUE DES APPROCHES METHODOLOGIQUES

Avant de discuter des diverses approches recensées, il est nécessaire de définir ce qu'est un port intelligent [Boullauazan et al., 2022]. Plusieurs chercheurs ont tenté de le définir sans apporter une définition claire et une compréhension globale du concept [Belmoukari et al., 2023; Boullauazan et al., 2022]. Ce n'est qu'en 2016 que Buiza et al. présentent une première définition du port intelligent basée sur des domaines d'activités [Buiza-Camacho-Camacho et al., 2016]. Cette définition a été revue par Molavi et al. [2020], qui à leur tour ont revisité le cadre des domaines d'activités. Les travaux de Buiza et al. en

2016 et Molavi et al. en 2020 étaient les premiers à définir le port intelligent par l'association à certains domaines d'activités [Buiza-Camacho-Camacho et al., 2016; Molavi et al., 2020]. Toutefois, ces chercheurs ont invité la communauté scientifique à effectuer des recherches supplémentaires pour ajouter d'autres nouveaux domaines d'activités émergents et présenter une définition claire et exhaustive du port intelligent. En continuité de ces travaux phares cités, Belmoukari et al. [2023] présentent une revue systématique rigoureuse qui intègre les différentes visions de la communauté scientifique pour valider et poursuivre les travaux débutés par Buiza et al. [2015] et Molavi et al. [2020], ainsi avoir une compréhension plus large et exhaustive du concept de port intelligent [Belmoukari et al., 2023]. À la suite de cette revue systématique, le port intelligent est défini selon sept domaines d'activités à savoir : opérations, ressources humaines, sûreté et sécurité, environnementale, énergétique, social et enfin infrastructures, équipements et technologies intelligents [Belmoukari et al., 2023]. Finalement, pour combler au manquement soulevé en littérature et apporter une compréhension exhaustive et claire du concept, Belmoukari et al. [2023] proposent cette définition exhaustive du port intelligent : « un port connecté, durable, sûr et automatisé, qui se base sur des infrastructures et équipements intelligents, du personnel qualifié et des pratiques managériales intelligentes, pour garantir la satisfaction client, la protection de l'environnement et une meilleure qualité de vie du citoyen ».

Le projet de transformation en port intelligent est un enjeu stratégique complexe, car le fait d'allouer des budgets importants dans l'achat de nouvelles technologies et solutions innovantes ne peut garantir la réussite du projet, ni d'escompter les gains et avantages supposés [Heilig et al., 2017]. Par exemple, le projet de logistique « smartPort » au port de Hambourg (Allemagne) a subi des pertes de plusieurs millions de dollars suite à la non-compréhension des avantages individuels et des intérêts divergents des acteurs [L. Heilig et al., 2017]. D'une manière générale, selon la littérature, les projets d'innovation numérique échouent soit suite à des obstacles techniques ou au refus d'implication des parties prenantes (p. ex., manque de compréhension, ressources financières et capacités limitées, absence de *business case*) [Boullauazan et al., 2022 ; Carlan et al., 2016]. D'autres chercheurs soulèvent des obstacles liés au processus de négociation long et complexe entre les différentes parties prenantes, tel que le port de Rotterdam qui a négocié pendant 20 ans auprès des différents acteurs pour la mise en place du système de communauté portuaire [Boullauazan et al., 2022].

À cet effet, pour réussir la transformation numérique selon le rapport émis par Valenciaport en 2020, les administrations portuaires doivent prendre en considération sept attributs indispensables pour se transformer en port intelligent à savoir : les acteurs et parties prenantes concernés par cette transformation, l'environnement portuaire, les pratiques et techniques à déployer, le choix des technologies innovantes à mobiliser, l'ordre séquentiel de l'implémentation des technologies innovantes, le coût des équipements et de l'infrastructure, le temps alloué pour la mobilisation de ces technologies [Valenciaport, 2020]. D'autres chercheurs estiment que l'implication et adhésion des différentes parties prenantes est la clé de la réussite de la transformation numérique [Boullauazan et al., 2022; Sys & Vanelslander, 2020]. De leur côté, Schumacher et al. [2019] recommandent la mise en place d'un plan stratégique sous forme de feuille de route pour orienter les décideurs dans le choix des technologies, équipements intelligents et pratiques managériales innovantes [Schumacher et al., 2019].

Pour réussir la transformation numérique et faire face à l'ensemble des obstacles, les administrations portuaires ont besoin d'un plan stratégique basé sur un processus par étapes [Boullauazan et al., 2022; Carlan et al., 2016; do Nascimento Dominguez et al., 2022]. Il s'agit d'une feuille de route qui décrit les étapes à suivre d'une manière séquentielle [Do Nascimento Dominguez et al., 2022; Edelman & Mergel, 2021], pour guider et orienter les administrations portuaires dans leur processus de transformation numérique [Do Nascimento Dominguez et al., 2022]. Elle représente une boîte à outils pour sélection des technologies intelligentes et les pratiques managériales innovantes à déployer selon le niveau de maturité cible et les ressources limitées [Do Nascimento Dominguez et al., 2022]. L'objectif de la feuille de route est de soutenir les décideurs dans la prise de décision [Boullauazan et al., 2022], formuler et décrire en détail la vision future du port [Sakty, 2016]. La feuille de route portuaire mène à des trajectoires de numérisation différente d'un port à l'autre selon l'ambition numérique des décideurs [Jović et al., 2019], les caractéristiques spécifiques et enjeux particuliers de chaque port [Karaš, 2020; Wu et al., 2013]. Finalement, cette transformation numérique se fait d'une manière continue, car les enjeux du port sont évolutifs dans le temps [Belmoukari et al., 2023]. À cet effet, les différentes approches méthodologiques de transformation numérique se sont d'abord réalisées dans le secteur manufacturier, puis dans le secteur portuaire. Car malgré le rôle crucial que joue l'industrie maritime comme maillon clé des chaînes d'approvisionnement, les chercheurs la considèrent très en retard et jugent qu'elle est en phase primaire de transformation numérique [de la Peña Zarzuelo et al., 2020], et doit s'inspirer des bonnes pratiques de l'Industrie 4.0 pour tendre vers le port intelligent [Hofmann & Rüschi, 2017; Liao et al., 2017; Lu, 2017; Oztemel & Gursev, 2020; Valenciaport, 2020]. Ces approches recensées en littérature de l'Industrie 4.0 puis du secteur portuaire sont présentées par ordre chronologique.

### 3.1 Feuille de route vers l'Industrie 4.0

Stich et al. [2018] ont développé une feuille de route pour la transformation numérique des industries. La première étape consiste à prendre connaissance de l'Industrie 4.0 et ses avantages pour une compréhension générale par l'ensemble du personnel et des parties prenantes. La deuxième étape permet d'évaluer l'indice de maturité à la base de l'indice Acatech. Le questionnaire développé par les auteurs se compose de 600 questions afin d'avoir une vision générale et détaillée sur l'entreprise. La troisième étape est l'analyse des résultats du questionnaire, pour identifier le niveau de maturité actuel global et par domaine. La quatrième étape permet de définir le niveau de maturité cible selon la catégorisation de l'outil Acatech, à la base des objectifs stratégiques de la direction. La cinquième étape est l'analyse des écarts entre le niveau de maturité actuel et ciblé, afin de sélectionner les domaines nécessitant des actions à mettre en œuvre [Stich et al., 2018].

Issa et al. [2018] proposent, quant à eux, une approche méthodologique qui repose sur trois étapes essentielles. Premièrement, ils proposent le calcul d'un indice de maturité où les auteurs choisissent le modèle de maturité des capacités (*Capacity Maturity Model*), qui est un modèle répandu dans le développement des systèmes d'information et logiciels. La deuxième étape est le déploiement et la mise en place de nouvelles technologies de l'informatique. Toutefois, cette étape doit être soutenue par une approche structurée et alignée des différents processus de l'organisation. À ce stade, les auteurs suggèrent deux modèles, soit le modèle pionnier « *Strategic*

*Alignment Model* » ou le modèle « *Business Pilar* ». Le premier permet aux organisations de tirer profit de l'implémentation des technologies de l'information, grâce à l'alignement de la stratégie numérique sur le processus d'affaires et celui des infrastructures afin d'avoir un équilibre. Le second consiste à l'alignement de la stratégie au niveau des cinq piliers phares (structure et processus, ressources humaines, stratégies, informatique, suivi et contrôle), car cette décision de numérisation exige que son déploiement et l'adoption soient appliqués sur tous les niveaux de l'organisation, ce qui permettra de tirer profit sur l'ensemble des échelons de l'organisation. La troisième étape est la mise en place d'une feuille de route, qui explique et définit l'ensemble des phases de déploiement et d'implémentation des technologies. La feuille de route est unique pour chaque organisation, elle permet d'orienter les décideurs dans le choix des technologies selon leur niveau de maturité, leur stratégie d'alignement ainsi que leur budget d'investissement. Les auteurs proposent 6 étapes pour la constitution de la feuille de route. La première est la mise en place d'une équipe de travail (*Task Force*), soit de nommer une équipe projet qui gèrera la transformation sous forme d'une approche holistique qui prend en considération l'ensemble des processus, flux d'information et outils. Dans cette étape, l'équipe projet doit évaluer d'une manière réaliste les objectifs de l'organisation par rapport à leur niveau de maturité actuel et les ressources allouées. La seconde étape consiste en l'évaluation du niveau de numérisation, soit la réalisation d'entretiens entre l'équipe projet et les experts de chaque domaine pour élaborer des questionnaires définis pour chaque département. Ces entretiens doivent porter sur trois dimensions fondamentales, soit l'organisation, technologies et processus. Ils serviront à calculer l'indice de maturité actuel de l'organisation. La troisième étape définition des actions : consiste à identifier les actions à entreprendre pour s'aligner avec la stratégie de la direction, et mettre en place des indicateurs d'évaluation pour mesurer l'impact des actions entreprises et l'avancement du projet. La quatrième étape consiste en la génération d'idées, soit l'organisation d'ateliers de travail entre les équipes du projet, experts du domaine et le personnel concerné par chaque action à entreprendre. Cette démarche implique les différents partenaires et facilite l'échange d'information. Cette collaboration et implication du personnel permet d'améliorer et de réussir la mise en œuvre des actions définies en feuille de route. 5) Estimation de l'impact de l'utilisation : Il s'agit de mettre en place un processus d'évaluation de la mise en place des technologies sous forme de tableau avec date, la description et les étapes au préalable nécessaires pour la mise en œuvre des technologies. Cette action permettra de hiérarchiser et prioriser selon une séquence l'implémentation des technologies. 6) Sélection des cas d'utilisation : Il s'agit d'identifier les technologies sélectionnées selon des critères d'inclusion et d'exclusion, soit le budget d'investissement alloué et le temps nécessaire de mise en place, car tous les projets sont contraints par la limite temporelle et budgétaire [Issa et al., 2018].

Ensuite, Schumacher et al. [2019] ont proposé une feuille de route stratégique pour la réalisation d'un modèle de transformation numérique. Ce modèle se compose de 9 étapes, soit : 1) Définition et engagement de l'équipe projet, 2) Recensement et étude de la stratégie des entreprises de la même activité qui se sont transformées en Industrie 4.0 pour s'aligner à leur niveau de maturité, 3) Évaluations de l'indice de maturité actuel, 4) Analyse des résultats de l'indice de maturité, 5) Identifications de l'indice de maturité cible selon les objectifs ciblés de la direction, 6) Analyse des écarts entre le niveau de

maturité cible et le niveau actuel, 7) À la suite des écarts retenus, la direction pourra ressortir les actions à entreprendre avec leur date d'échéance, 8) Nommer des ateliers de travail sous la direction de l'équipe projet pour mener les actions définies et déterminer des échéances et des indicateurs d'évaluation continue pour l'avancement du projet, et 9) Intégration et adhésion du personnel à la réalisation de la feuille de route de l'Industrie 4.0 [Schumacher et al., 2019].

Finalement, Stich et al. [2020] présentent une feuille de route personnalisée pour la transformation numérique pour les PME manufacturières. À cet effet, les auteurs déterminent 4 forces structurelles d'une organisation pour une approche holistique de transformation numérique, soit 1) Ressources (combinent toutes les infrastructures, équipements, machines, outils et biens), 2) Culture, 3) Organisation et structure de l'entreprise et 4) Les systèmes d'information (toutes les applications, logiciels et systèmes informatiques). Ces forces seront les axes de mesure du questionnaire d'évaluation de maturité. Une fois l'indice de maturité actuel est évalué, les auteurs proposent aux décideurs d'identifier la stratégie et les objectifs pertinents de l'entreprise selon l'environnement, afin de déterminer le niveau de maturité cible souhaité. Ensuite, l'analyse des écarts entre le niveau de maturité cible et le niveau de maturité actuel, pour déterminer les actions à mettre en œuvre. L'étape suivante consiste à sélectionner les technologies numériques qui correspondent au plan d'action tout en prenant en considération la capacité des ressources et le coût d'investissement. Finalement, cette dernière étape consiste à l'implémentation des technologies numériques sélectionnées selon un ordre chronologique [Stich et al., 2020].

### 3.2 Feuille de route vers le port intelligent

En 2019, Deniaud et al. proposent une méthodologie basée sur la roue de Deming (*Plan, Do, Check, Act*) pour la transformation vers une la chaîne logistique 4.0. Premièrement, l'étape « *Plan* » consiste à identifier et définir les objectifs stratégiques par la direction générale selon sa vision et ses attentes. Deuxièmement, l'étape « *Do* » permet d'élaborer un questionnaire pour une évaluation qualitative des niveaux de maturités relatifs aux différents domaines et axes visés par la transformation. Le questionnaire sous forme d'une question par axe afin d'avoir une vision globale de l'industrie. Troisièmement, l'étape « *Check* » exige l'évaluation des résultats générés du questionnaire de maturité des différents axes grâce à un outil d'aide à la prise de décision sous forme de tableau où il est défini pour chaque axe l'objectif ciblé et le niveau de maturité actuel de l'organisation. Suite à la création de ce tableau, les dirigeants analysent les écarts qui résultent de la différence entre les objectifs stratégiques et les résultats du questionnaire de calcul des indices de maturité. Finalement, l'étape « *Act* » consiste à mettre en œuvre des plans d'action longs, moyens et courts termes pour atteindre les objectifs stratégiques ciblés [Deniaud et al., 2019].

Ensuite, Gonzales et al. [2020] ont proposé la conception d'un outil appelé « *End to End Tool* » pour une transformation numérique en port intelligent. Cet outil permet de ressortir la situation passée, actuelle et future, en vue d'identifier les scénarios de numérisation possibles. La première étape consiste à identifier l'état actuel de maturité numérique. Deuxièmement, l'administration portuaire détermine le niveau de maturité cible. Et finalement, les décideurs doivent mettre en place des stratégies et plans d'action pour atteindre la cible. Cet outil est conçu pour une prise de décision efficace en prenant en considération les différents facteurs internes ainsi que l'environnement externe du port. Cependant, les auteurs

fournissent peu d'explications quant aux outils et méthodes à déployer lors de chaque étape et ne proposent pas une feuille de route accompagnant les administrations portuaires jusqu'à la mise en place des technologies numériques [González-Cancelas et al., 2021].

En 2022, Jeevan et al. ont développé une méthodologie d'amélioration continue du port intelligent en prenant comme référence les pratiques de l'Industrie 4.0 au sein du secteur portuaire. Selon leur étude bibliométrique, cette méthodologie se décline en 4 étapes. Premièrement, « l'adoption » consiste à une compréhension générale des avantages de la transformation du port maritime comme acteur de la chaîne de l'Industrie 4.0. La deuxième étape, « l'implémentation », se base sur la mise en œuvre des technologies. Ensuite, l'étape « opération » représente l'adoption des pratiques managériales intelligentes et le déploiement des technologies numériques appliquées. Finalement, l'étape « évaluation » consiste à évaluer la transformation grâce à des indicateurs, pour s'assurer de l'atteinte des objectifs souhaités. Selon l'étude bibliométrique faite par les auteurs, les 4 étapes peuvent être. Finalement, cette approche proposée ne représente pas une feuille de route, mais plutôt un modèle d'amélioration continue extrait de l'Industrie 4.0 [Jeevan et al., 2022].

Dans la même année, Do Nascimento et al. proposent une feuille de route pour la transformation numérique des ports brésiliens en port intelligent. Cette feuille de route se compose en 9 étapes : 1) la prise en connaissance davantage du port intelligent, l'environnement portuaire et les éléments déterminants de cette transition, 2) le recensement des différentes pratiques managériales intelligentes et technologies innovantes mobilisées dans le cadre d'un port intelligent, 3) la définition du niveau de maturité souhaité et l'objectif visé, 4) l'analyse de l'état actuel grâce au calcul de l'indice de maturité pour dresser un état des lieux, 5) la boîte à outils qui permet de sélectionner les outils (technologies innovantes et pratiques managériales intelligentes) en concertation avec des experts de chaque domaine, 6) le niveau de la mise en œuvre de la boîte à outils sélectionnée selon l'ordre séquentiel de la mise en œuvre des technologies, 7) le délai de la mise en œuvre, à ce stade les technologies doivent être classées du court, moyen à long terme grâce aux consultations des fournisseurs externes et selon la durée moyenne de déploiement au sein de 3 ports minimum, 8) le coût de mise en œuvre : dans cette étape les technologies sélectionnées doivent être classées de court, moyen à long terme et 9) l'implication et l'adhésion de l'ensemble des parties prenantes pour la réussite du projet de transformation numérique du port [Do Nascimento Dominguez et al., 2022].

Finalement, Boullauazan et al. (2022) développent un premier modèle d'évaluation de maturité pour les ports intelligents appelé « *Smart Port Maturity Model* », qui portent sur 5 domaines, à savoir : l'énergie et l'environnement, la capacité, la sûreté et la sécurité, les opérations portuaires et la synchronodalité. À la base de ce modèle, les auteurs suggèrent quatre étapes essentielles pour la transition vers un port intelligent. Ces étapes peuvent être conçues comme une première feuille de route pour soutenir le choix stratégique des décideurs lors de la transformation numérique des ports et une compréhension approfondie du concept de port intelligent par l'ensemble des parties prenantes : 1) définition des objectifs visés à court, moyen et long terme pour atteindre le niveau de maturité souhaitée par domaine, 2) évaluation de l'indice de maturité avec le Smart Port Maturity Model proposé afin de dresser l'état des lieux et d'une compréhension commune de l'environnement du port, 3) analyse des résultats et des écarts

par domaine, 4) définition des actions pour la mise en œuvre des technologies intelligentes [Boullauazan et al., 2022].

#### 4 ANALYSE ET RESULTAT

Pour mener une synthèse de la littérature recensée, nous avons formulé et identifié dans le tableau 1 les différentes étapes qui composent les feuilles de route recensées pour la transformation numérique. Il s'agit de 16 étapes identifiées par les différents auteurs qui décrivent le processus de transformation numérique que soit en Industrie 4.0 ou en port intelligent. Ces étapes sont classées en ordre chronologique avec la mention du ou des auteurs, et le pourcentage de citation.

**Tableau 1. Les différentes étapes recensées en transformation numérique**

Étapes	Auteurs	Total
1) Prise de connaissance de la transformation numérique et ses avantages	[Stich et al., 2018] [Jeevan et al., 2022] [do Nascimento Dominguez et al., 2022],	3 (33 %)
2) Mise en place d'une équipe de travail	[Issa et al., 2018] [Schumacher et al., 2019]	2 (22 %)
3) Recensement et étude de la stratégie des entreprises de la même activité	[Schumacher et al., 2019] [Do Nascimento Dominguez et al., 2022]	3 (33 %)
4) Évaluation et calcul de l'indice de maturité	[Stich et al., 2018] [Issa et al., 2018] [Schumacher et al., 2019] [Deniaud et al., 2019] [Stich et al., 2020] [González-Cancelas et al., 2021] [do Nascimento Dominguez et al., 2022] [Boullauazan et al., 2022]	8 (89 %)
5) Analyse des résultats (global et par domaine) de l'indice de maturité	[Stich et al., 2018] [Schumacher et al., 2019] [Deniaud et al., 2019] [Stich et al., 2020] [González-Cancelas et al., 2021] [Boullauazan et al., 2022]	6 (67 %)
6) Définition du niveau de maturité ciblé	[Stich et al., 2018] [Schumacher et al., 2019] [Deniaud et al., 2019] [Stich et al., 2020] [González-Cancelas et al., 2021] [do Nascimento Dominguez et al., 2022] [Boullauazan et al., 2022]	8 (89 %)
7) Analyse des écarts entre le niveau de maturité actuel et ciblé	[Stich et al., 2018] [Schumacher et al., 2019] [Deniaud et al., 2019] [Stich et al., 2020] [González-Cancelas et al., 2021] [Boullauazan et al., 2022]	6 (67 %)
8) Définition	[Issa et al., 2018]	7

des actions	[Schumacher et al., 2019] [Deniaud et al., 2019] [Stich et al., 2020] [González-Cancelas et al., 2021] [Jeevan et al., 2022] [Boullauazan et al., 2022]	(78 %)
9) Génération d'idées	[Issa et al., 2018],	1 (11 %)
10) Estimation de l'impact d'utilisation	[Issa et al., 2018]	1 (11 %)
11) Sélection des cas d'utilisation	[Issa et al., 2018] [Schumacher et al., 2019] [Stich et al., 2020] [do Nascimento Dominguez et al., 2022]	4 (44 %)
12) Délai de la mise en œuvre	[Do Nascimento Dominguez et al., 2022] [Schumacher et al., 2019] [Stich et al., 2020]	3 (33 %)
13) Coûts du déploiement des technologies	[Do Nascimento Dominguez et al., 2022] [Schumacher et al., 2019] [Stich et al., 2020]	3 (33 %)
14) Implication et adhésion des parties prenantes	[Schumacher et al., 2019] [Do Nascimento Dominguez et al., 2022]	2 (22 %)
15) Déploiement et la mise en place de nouvelles technologies selon un ordre chronologique.	[Issa et al., 2018] [Schumacher et al., 2019] [Stich et al., 2020] [Jeevan et al., 2022],	4 (44 %)
16) Évaluation de la transformation	[Jeevan et al., 2022]	1 (11 %)

Suivant les résultats présentés dans tableau 1 ci-dessus, les étapes « Évaluation et calcul de l'indice de maturité » et « Définition du niveau de maturité ciblé » sont citées par 89 % des auteurs, qui les définissent dans leur proposition de feuille de route, suivi par l'étape « Définition des actions » à 78 %, ensuite des étapes « Analyse des résultats (global et par domaine) de l'indice de maturité » et « Analyse des écarts entre le niveau de maturité actuel et ciblé » qui sont citées à environ 67 %. Les étapes « Sélection des cas d'utilisation » et « Le déploiement et la mise en place de nouvelles technologies de l'informatique selon un ordre chronologique » sont citées à 44 %.

Cependant, pour raffiner la structure de la feuille de route, certaines étapes font partie de la même famille et peuvent être regroupées. Par exemple, les étapes « Délai de la mise en œuvre », « Coûts du déploiement des technologies » et « Estimation de l'impact d'utilisation » font partie de l'étape « Sélection des cas d'utilisation ». L'étape « Évaluation de la transformation » a été citée uniquement une seule fois, mais malgré ceci, elle sera considérée dans la feuille de route proposée dans cet article, car le port intelligent et ses enjeux sont en évolution continue [Belmoukari, 2023], ainsi que toute transformation doit faire l'objet d'une approche d'amélioration

continue [Ochoa, 2016]. Cette étape est fondamentale pour assurer l'évaluation du processus et l'atteinte des objectifs ciblés.

Concernant l'étape « Implication et adhésion des parties prenantes », elle est indispensable pour réussir la transformation numérique du port intelligent. Avant le début du projet, toutes les parties prenantes doivent comprendre les avantages de cette transformation, les caractéristiques du port et son environnement grâce à la bonne communication et leur implication tout au long du processus. L'adhésion et l'implication des parties prenantes permettront d'éviter des obstacles liés à la divergence des intérêts des différents acteurs et prendre en considération leur capacité et ressource.

Pour l'étape « Génération d'idées » qui est citée une seule fois, elle peut être regroupée avec l'étape « Mise en place d'une équipe de travail », car le rôle de l'équipe de travail est de générer des idées et poursuivre le bon déroulement du projet. Cette équipe de travail doit être constituée des chercheurs universitaires, des experts de chaque domaine, des dirigeants et les responsables de chaque domaine [Issa, 2018].

Sur la base de l'analyse ci-dessus, la feuille de route proposée pour la transformation en port intelligent est divisée selon les 11 étapes suivantes : 1) Prise de connaissance de la transformation numérique et ses avantages, 2) Implication et adhésion des parties prenantes, 3) Mise en place d'une équipe de travail (Task Force), 4) Recensement et étude de la stratégie des entreprises de la même activité (boîte à outils), 5) Évaluation et calcul de l'indice de maturité, 6) Analyse des résultats (global et par domaine) de l'indice de maturité, 7) Définitions de niveau de maturité cible, 8) Analyse des écarts entre le niveau de maturité actuel et ciblé, 9) Sélection des cas d'utilisation, 10) Déploiement et la mise en place de nouvelles technologies de l'informatique selon un ordre chronologique et 11) Évaluation de la transformation.

Cette feuille de route permettra i) de sélectionner les technologies numériques qui permettent l'atteinte des objectifs stratégiques selon le coût d'investissement, les ressources et l'aspect temporal, ii) de hiérarchiser et prioriser la mise en place et l'implémentation des technologies numériques selon un ordre séquentiel, iii) de déterminer des indicateurs qui évaluent la mise en œuvre et l'implémentation des technologies intelligentes, et finalement iv) de mettre en œuvre les technologies intelligentes et évaluer leur impact vis-à-vis les objectifs ciblés. Ce processus sera redéployé par la suite (récurif) sur une base d'amélioration en continue et à chaque fois que les enjeux portuaires évoluent dans le temps.

## 5 CONCLUSION

Le développement rapide de l'Industrie 4.0 invite les ports à suivre cette ère de numérisation et se transformer en port intelligent. Toutefois, le secteur maritime demeure en retard par rapport aux autres maillons de la chaîne d'approvisionnement. Les administrations portuaires ont besoin d'une approche méthodologique permettant de faire les bons choix pour mener à bien leur transition vers le port intelligent. Cet article présente une revue de littérature sur les différentes approches en transformation numérique existante et propose une synthèse de l'ensemble des approches méthodologiques recensées. Il s'agit d'une feuille de route pour accompagner les administrations portuaires dans leur transformation numérique. Comme perspective de travaux futurs, la feuille de route proposée doit être validée par une étude de cas réelle.

## 6 REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'équipe de l'Administration portuaire de Trois-Rivières pour sa collaboration aux travaux ainsi que son soutien financier dans le cadre d'une subvention Mitacs.

## 7 REFERENCES

- Adolf, NG, & Liu, J. (2014). Port-focal logistics and global supply chains. *Springer*.
- Belmoukari, B., Audy, J.-F., & Forget, P. (2023). Smart port: a systematic literature review. *European Transport Research Review*, 15(1), 1-12.
- Boullauazan, Y., Sys, C., & Vanelslander, T. (2022). Developing and demonstrating a maturity model for smart ports. *Maritime Policy & Management*, 1-19.
- Buiza-Camacho-Camacho, G., del Mar Cerbán-Jiménez, M., & González-Gaya, C. (2016). Assessment of the factors influencing on a smart port with an analytic hierarchy process. *Revista DYNA*, 91, 498-501.
- Carlan, V., Sys, C., & Vanelslander, T. (2016). How port community systems can contribute to port competitiveness: Developing a cost-benefit framework. *Research in Transportation Business & Management*, 19, 51-64.
- De la Peña Zarzuelo, I., Soeane, M. J. F., & Bermúdez, B. L. (2020). Industry 4.0 in the port and maritime industry: A literature review. *Journal of Industrial Information Integration*, 20, 100173.
- Del Giudice, M., Di Vaio, A., Hassan, R., & Palladino, R. (2022). Digitalization and new technologies for sustainable business models at the ship-port interface: A bibliometric analysis. *Maritime Policy & Management*, 49(3), 410-446.
- Deniaud, I., Marmier, F., & Michalak, J.-L. (2019). Méthodologie et outil de définition de la stratégie de transition 4.0 pour la chaîne logistique. *Bureau d'Économie Théorique Et Appliqué BETA*.
- Do Nascimento Dominguez, G., Gorges, S. C., & Silva, v. m. d. (2022). Roadmap for implementing smart practices at seaports and terminals. *Revista Eletrônica de Estratégia & Negócios*, 15, 73-96.
- Edelmann, N., & Mergel, I. (2021). Co-production of digital public services in Austrian public administrations. *Administrative Sciences*, 11(1), 22.
- González-Cancelas, N., Serrano, B. M., Flores, F. S., & C-Majolero, N. (2021). Diagnosis of the digitalization of the Spanish ports: End to End tool. *World Scientific News*, 155, 47-64.
- Heilig, L., Lalla-Ruiz, E., & Voß, S. (2017). Digital transformation in maritime ports: analysis and a game theoretic framework. *Netnomics: Economic research and electronic networking*, 18(2), 227-254.
- Hofmann, E., & Rüsich, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in industry*, 89, 23-34.
- Issa, A., Hatiboglu, B., Bildstein, A., & Bauernhansl, T. (2018). Industrie 4.0 roadmap: Framework for digital transformation based on the concepts of capability maturity and alignment. *Procedia Cirp*, 72, 973-978.
- Jeevan, J., Selvaduray, M., Mohd Salleh, N. H., Ngah, A. H., & Zailani, S. (2022). Evolution of Industrial Revolution 4.0 in seaport system: An interpretation from a bibliometric analysis. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 14(4), 229-250.
- Jović, M., Kavran, N., Aksentijević, S., & Tijan, E. (2019). The transition of Croatian seaports into smart ports. *2019 42nd*

- International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, (pp. 1386-1390). IEEE.
- Jun, W. K., Lee, M.-K., & Choi, J. Y. (2018). Impact of the smart port industry on the Korean national economy using input-output analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 118, 480-493.
- Karás, A. (2020). Smart port as a key to the future development of modern ports. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 14(1).
- Lazarevna, P. A., Nikolaevna, K. S., Alekseevna, V. V., & Konstantinovich, Y. E. (2020). Digitalization tools in ensuring the efficiency of the enterprise activity. *Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference*, (pp. 1-4).
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. d. F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609-3629.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10.
- Macaulay, J., Buckalew, L., & Chung, G. (2015). Internet of things in logistics. *DHL Trend Research*, 1(1), 1-27.
- Min, H. (2022). Developing a smart port architecture and essential elements in the era of Industry 4.0. *Maritime Economics & Logistics*, 1-19.
- Molavi, A., Lim, G. J., & Race, B. (2020). A framework for building a smart port and smart port index. *International journal of sustainable transportation*, 14(9), 686-700.
- Mouagni, A. Z. (2018). Contribution à l'évaluation de la performance économique des ports et terminaux à conteneurs : Cas du port Tanger Med. *Faculté des Sciences Economiques Juridiques et Sociales de Tanger*.
- Ochoa, O. L. (2016). Modelos de madurez digital: ¿en qué consisten y qué podemos aprender de ellos?/digital maturity models: what are they and what can we learn from them? *Boletín de estudios económicos*, 71(219), 573.
- Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of intelligent manufacturing*, 31, 127-182.
- Philipp, R. (2020). Digital readiness index assessment towards smart port development. *Sustainability Management Forum/ Nachhaltigkeits Management Forum*.
- Sakty, K. G. E. (2016). Logistics road map for smart seaports. *Renewable Energy and Sustainable Development*, 2(2), 91-95.
- Scholz-Reiter, B., Windt, K., Kolditz, J., Böse, F., Hildebrandt, T., Philipp, T., & Höhns, H. (2004). New concepts of modelling and evaluating autonomous logistic processes. *Manufacturing, modelling, management and control*.
- Schumacher, A., Nemeth, T., & Sihm, W. (2019). Roadmapping towards industrial digitalization based on an Industry 4.0 maturity model for manufacturing enterprises. *Procedia Cirp*, 79, 409-414.
- Stich, V., Gudergan, G., & Zeller, V. (2018). Need and solution to transform the manufacturing industry in the age of Industry 4.0—a capability maturity index approach. Collaborative Networks of Cognitive Systems: *In Collaborative Networks of Cognitive Systems: 19th IFIP WG 5.5 Working Conference on Virtual Enterprises, PRO-VE 2018, Cardiff, UK, September 17-19, 2018, Proceedings 19* (pp. 33-42). Springer International Publishing.
- Stich, V., Zeller, V., Hicking, J., & Kraut, A. (2020). Measures for a successful digital transformation of SMEs. *Procedia cirp*, 93, 286-291.
- Sys, C., & Vanelslander, T. (2020). Future maritime supply networks: Key issues in and solutions. In *Maritime Supply Chains* (pp. 261-282). Elsevier.
- Triska, Y., Frazzon, E. M., Silva, V. M. D., & Heilig, L. (2022). Smart port terminals: conceptual framework, maturity modeling and research agenda. *Maritime Policy & Management*, 1-24.
- UNCTAD. 2019. Review of Maritime Transport 2019. Geneva: United Nations publication, 105. 978-92-1-112958-8.
- Valenciaport, F. (2020). Smart Ports Manual: Strategy and Roadmap. In: Recuperado de <https://publications.iadb.org/en/smart-ports-manual-strategy>.
- Wu, Y., Xiong, X., Gang, X., & Nyberg, T. R. (2013). Study on intelligent port under the construction of smart city. *In Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics* (pp. 175-179). IEEE.