

La connectivité maritime : une approche multidimensionnelle basée sur la théorie des réseaux

Victor PETROFF*

Résumé – La connectivité maritime représente un défi pour l’essor des ports et du commerce maritime mondial. Ce sujet, étudié depuis le début du 21^e siècle, a acquis une importance croissante, au point que la Cnuccd a établi plusieurs indices évaluant la connectivité maritime des pays et des ports. Afin de comprendre les dynamiques portuaires et le rôle de la connectivité maritime dans le développement local, cet article analyse la connectivité portuaire dans le contexte global du réseau mondial de transport maritime de conteneurs en utilisant la théorie des réseaux. En décomposant l’indice de connectivité portuaire des transports maritimes (PLSCI), nous analysons pour les années 2007 et 2016 le rôle de chacun de ses composants : le nombre de navires, la capacité de charge, le nombre de services, le nombre de compagnies, la taille maximale des navires et le nombre de connexions directes du port avec le réseau mondial de transport maritime. À la suite, nous intégrons une dimension géographique en introduisant une variable de connectivité basée sur la distance, en partant de l’hypothèse qu’il n’existe pas qu’une seule forme de connectivité mais plusieurs selon la distance des échanges. Nos résultats montrent que certains ports bénéficiant d’un score de connectivité globale élevé n’obtiennent pas des scores importants dans toutes nos catégories, et inversement. Cette analyse souligne clairement que la connectivité ne peut être considérée simplement comme un indicateur global.

Classification JEL

L91, R4

Mots-clés

Connectivité maritime
Ports
Théorie des réseaux
Développement local

* Laboratoire d’Économie Appliquée au Développement (LEAD), Université de Toulon ; victor-petroff@etud.univ-tln.fr

1. INTRODUCTION

Depuis les années 1980, le volume des échanges conteneurisés a considérablement augmenté (Notteboom et Rodrigue, 2008). Aujourd'hui, 80 % des échanges mondiaux transitent par la mer (Cnuced, 2023). Les ports, dans ce système globalisé, occupent une place essentielle et fonctionnent comme des espaces stratégiques, assurant la liaison entre les zones terrestres et les zones maritimes, tout en offrant aux acteurs du commerce international un accès facilité à une multitude de marchés plus ou moins lointains. Le développement portuaire permet de dynamiser l'arrière-pays par des effets économiques directs et indirects comme des créations d'emplois, l'installation d'entreprises proches de la zone portuaire, ou bien encore le développement d'infrastructures.

Avec la globalisation de l'économie et l'internationalisation des chaînes de production, il est devenu capital que les ports développent leur connectivité maritime afin d'exister dans un marché de plus en plus concurrentiel. Selon Tovar et Wall (2022), ce concept se réfère à l'efficacité des réseaux de transport maritime, englobant des aspects tels que le nombre de destinations desservies, la fréquence des services et les coûts logistiques (Parola et al., 2017). L'augmentation de la connectivité permet à un port d'être plus attractif (Li et al., 2023) car cela peut entraîner une baisse des taux de fret (Calatayud et al., 2016 ; Wilmsmeier et Hoffmann, 2008) et une meilleure efficacité (Tovar et Wall, 2022). Au contraire, une mauvaise connectivité aura un impact négatif sur le développement à cause d'une faible efficacité et de coût de fret élevé (Lun et Hoffmann, 2016).

La connectivité portuaire est fonction des décisions des ports et des compagnies maritimes. Les ports investissent dans des infrastructures performantes comme les équipements de manutention, les terminaux ou les zones de stockage afin d'optimiser leur efficacité opérationnelle que sont les opérations de chargement, de déchargement ou de transbordement. Le principal intérêt à cela est d'attirer des compagnies maritimes qui créent des lignes de service (Calatayud et al., 2016), principalement en fonction des coûts portuaires, de la connectivité de l'arrière-pays et des zones de localisation logistique (Baštuĝ et al., 2022). Cette interdépendance contribue au développement du transport maritime international et influence la connectivité portuaire.

Pour permettre aux autorités portuaires de se situer dans le réseau maritime international de porte-conteneurs, la Conférence des Nations unies sur le commerce et le développement (Cnuced) a créé l'indice portuaire de connectivité des transports maritimes (PLSCI). Cet indice, dérivé de l'indice de connectivité des transports maritimes (LSCI), permet aux ports de connaître leur connectivité et de se comparer à d'autres ports. Il intègre 6 composants : le nombre de navires par semaine passant par le port (A), la capacité de charge annuelle déployée (B), le nombre de services de transport maritime de ligne passant par le port (C), le nombre de compagnies de transport maritime de ligne passant par le port (D), la taille en équivalent vingt-pieds (EVP) du plus grand porte-conteneurs passant par le port (E)

et le nombre de connexions directes offertes par le port (F). Récemment, cet indice a fait l'objet d'un intérêt grandissant dans les travaux scientifiques, que ce soit dans des travaux sur l'analyse de réseau (Pan et al., 2022) ou l'efficacité portuaire (Tovar et Wall, 2022 ; Rødseth et al., 2023).

Cet article s'intéresse à l'évolution de la connectivité du réseau mondial de transport par conteneurs sur deux années distinctes, 2007 et 2016, en analysant les itinéraires des transporteurs grâce à la théorie des graphes. Par la suite, nous tentons de comprendre le rôle des différents composants du PLSCI sur la connectivité portuaire et nous testons l'idée qu'il existe différents types de connectivité selon la distance géographique.

La suite de l'article prend la forme suivante. La deuxième section est une revue de la littérature sur la connectivité maritime et ses indicateurs. La troisième section décrit les données et la méthodologie utilisées. La quatrième section présente et discute des résultats.

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Avec le développement rapide du commerce de marchandises par voie maritime, des chercheurs se sont intéressés aux déterminants du coût du fret pour expliquer le commerce international (Radelet et Sachs, 1998) avec l'hypothèse principale que celui-ci était dépendant de la distance (Kumar et Hoffmann, 2002). Mais l'intégration croissante des ports dans le réseau mondial de transport maritime, dû à l'éclatement des chaînes de production, a diminué leurs contraintes géographiques. De là, certains chercheurs ont commencé à introduire des variables de connectivité dans leurs travaux.

Par exemple, Limao et Venables (2001) ont utilisé, dans un modèle de gravité, une variable binaire pour prendre en compte le fait que deux pays qui échangent sont voisins, avec l'idée que cela réduit le coût de transport. Wilmsmeier et al. (2006), pour estimer la connectivité maritime d'un pays, ont utilisé le nombre de services de ligne directe entre les ports de deux pays. Cette approche préfigure ce que deviendra ultérieurement le LSCI. La même année, Ramos et al. (2006) ont introduit 3 variables de connectivité maritime au niveau des pays dans un modèle de gravité : le nombre de lignes maritimes, la capacité des navires et le trafic portuaire. Toujours dans l'idée d'intégrer la connectivité en tant que déterminant des coûts de transport, Martinez-Zarzoso et Wilmsmeier (2008) ont employé 5 variables de connectivité que sont : le déploiement de la flotte, la taille moyenne des navires dans les services, la capacité dans les services, le nombre de lignes maritimes et les opportunités de transport maritime entre les ports des pays observés. Wilmsmeier et Hoffmann (2008) ont, quant à eux, développé un indice de connectivité maritime au niveau des pays à l'aide de l'analyse en composante principale, en incluant le nombre de transporteurs passant par le pays, le nombre de conteneurs (en EVP) déployés sur les services directs, le nombre de services directs, le nombre de navires déployés, le nombre total de possibilités de transport maritime et la taille maximale (en EVP) du plus grand navire passant par le port.

Ces premiers travaux ont permis de mettre en évidence qu'une augmentation de la connectivité maritime permet de réduire les coûts de transport. En effet, la connectivité contribue principalement à obtenir des économies d'échelle et à favoriser une plus grande concurrence entre les transporteurs (Wilmsmeier et al., 2006). La réduction des coûts de transport permet ainsi au port d'attirer plus de compagnies maritimes et de services, permettant un développement de son activité.

C'est dans ce contexte que la CnuCED a créé en 2004 le LSCI, qui approxime la connectivité maritime à l'échelle d'un pays (Hoffmann, 2005). À ses débuts, le LSCI a été calculé à partir de cinq composants¹ : le trafic maritime passant par le pays, la capacité de conteneurs des navires (en EVP), le tonnage maximal des navires, le nombre de services maritimes et le nombre de compagnies opérant dans le pays. Plus tard, il sera complété par un indice sur la connectivité bilatérale des transports maritimes (LSBCI) qui mesure le niveau d'intégration de deux pays dans le réseau international de transport maritime (Fugazza et al., 2015).

Après sa publication, le LSCI est utilisé dans différents travaux sur le commerce international (Lun et Hoffmann, 2016 ; Fugazza et Hoffman, 2017) ou sur l'efficacité portuaire (Oliveira et Cariou, 2015 ; Suárez-Alemán et al., 2016 ; Serebrisky et al., 2016). La plupart des études aboutissent à la conclusion que la connectivité exerce un impact significativement positif sur la performance économique, opérationnelle et logistique des ports ainsi que sur celle des pays intégrés au réseau mondial de transport maritime.

Cependant, l'estimation de la connectivité au niveau des pays ne permet pas d'obtenir des résultats clairs et solides sur ses effets au niveau portuaire. C'est pourquoi, en 2019, la CnuCED introduit le PLSCI qui permet d'évaluer l'intégration d'un port dans le système mondial de transport maritime. Il est estimé selon la même méthodologie que le LSCI et englobe plus de 900 ports. Plus adapté aux études portuaires, il a récemment été intégré aux recherches sur le transport maritime, notamment dans des travaux portant sur l'efficacité portuaire. Par exemple, Tovar et Wall (2022) l'ont utilisé dans un modèle économétrique afin d'estimer le rôle de la connectivité portuaire sur l'efficacité de 16 ports espagnols. Ils ont conclu que la connectivité joue un rôle positif dans l'efficacité portuaire. Jamain et al. (2022) ont obtenu le même résultat sur un échantillon de 57 ports internationaux. Rødseth et al. (2023), quant à eux, l'ont utilisé sur un échantillon de 8 ports norvégiens, mais concluent que le rôle de la connectivité dans l'efficacité portuaire n'est pas significatif. L'indice est aussi utilisé dans des travaux sur l'identification de ports à conteneur stratégiques (Carresse et al., 2022) ou en théorie des graphes (Pan et al., 2022).

Malgré leur emploi répandu dans la littérature, les indices de la CnuCED sont confrontés à des limites. Par exemple, ils sont basés uniquement sur des facteurs de qualité, où chaque variable est pondérée de manière égale (Martinez-Moya et Feo-Valero, 2020). De plus, ils ne montrent qu'une partie de la connectivité et n'entrent pas dans les détails (Bartholdi et al., 2016). Ainsi, des chercheurs vont s'appuyer sur

¹ En 2016, un sixième composant est ajouté : le nombre de pays connectés au pays étudié.

la théorie des graphes et la diversité des indicateurs pour analyser et estimer des scores d'intégration maritime. Les premiers travaux se concentrent sur la connectivité de l'avant-pays portuaire en utilisant des variables "classiques" de la théorie des réseaux telles que la centralité, le degré et la vulnérabilité (Ducruet et al., 2010 ; Kaluza et al., 2010 ; Wang et Cullinane, 2016). Plus récemment, des méthodologies ont été développées pour créer des indicateurs de connectivité originaux. Par exemple, Jiang et al. (2015) ont introduit deux indices de connectivité portuaire basés sur le temps et la capacité de transport. Bartholdi et al. (2016) ont développé une mesure de connectivité basée sur l'algorithme de Kleinberg (1999) « Hyperlink-Induced Topic Search (HITS) ». Cet indice permet d'avoir une analyse plus détaillée sur l'intégration portuaire, car il produit des scores différents selon les importations et exportations du port. Martinez-Moya et Feo-Valero (2020) ont construit un indice de connectivité qui intègre non seulement la quantité de connexions mais également leur qualité. Dans un premier temps, ils utilisent l'indice quantitatif « Annualised Slot Capacity (ASC) » de Lam et Yap (2008), basé sur la taille moyenne des navires transitant par un port et leur fréquence de passage. Ils multiplient ensuite cet indice avec un indice de connectivité qualitatif, compris entre 0 et 1, qui prend en compte le nombre de services maritimes et le nombre de ports desservis. Ainsi, plus la qualité des connexions est élevée, plus le score de connectivité globale sera important. Toutefois, leur approche se limite aux connexions directes entre les ports. Jarumaneeroj et al. (2023) ont récemment créé un indice de connectivité des ports à conteneurs selon les composants du LSCI. Ils l'ont ensuite décomposé afin de saisir la contribution de chacun au score global de connectivité des ports.

De manière générale, la littérature sur la connectivité a été traitée dans de nombreux domaines économiques : commerce international, efficacité portuaire, théorie des réseaux, etc. S'ils ont été calculés de différentes manières, les indicateurs de connectivité continuent de représenter les liaisons portuaires à l'échelle mondiale sans offrir une analyse détaillée de la connectivité maritime. L'objectif de cette étude est de pallier cette lacune en appréhendant la connectivité au niveau global, puis en élaborant des indices de connectivité prenant en compte la distance physique des échanges.

3. DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE

Les données utilisées dans ce travail sont tirées de *Drewry Container Forecaster* pour les années 2007 et 2016 et couvrent, respectivement, 206 et 191 services transrégionaux. L'utilisation de deux années distinctes nous permet d'observer l'évolution du réseau de transport maritime de porte-conteneurs et d'appliquer empiriquement l'hypothèse de différents types de connectivité sur plusieurs réseaux.

3.1. Théorie des réseaux

La plupart des travaux sur la connectivité globale du réseau mondial de transport maritime utilisent des indices tels que le degré moyen, la densité du réseau ou la longueur moyenne du plus court chemin (Hu et Zhu, 2009 ; Ducruet et Notteboom,

2012 ; Kang et al., 2022). Nous les appliquons à notre graphe pondéré $G = (N, E)$ avec N l'ensemble des nœuds et E les liens entre ces nœuds. Les indices sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Les indices de réseau utilisés

Indices	Formules	Définition
Densité du réseau	$D_G = \frac{m_G}{n_G(n_G - 1)}$	L'indice de densité permet de connaître le niveau de connectivité entre les nœuds d'un réseau. Plus l'indice est proche de 1 et plus les nœuds seront connectés entre eux.
Degré moyen du réseau	$DM_G = \sum_j^n a_{ij}$	Le degré d'un nœud est le nombre de liens adjacents uniques connectés au nœud.
Longueur moyenne du plus court chemin (LMPCC)	$A_G = \sum_{s,t \in V} \frac{d(s,t)}{n_G(n_G - 1)}$	Le LMPCC mesure la distance moyenne des chemins les plus courts pour toutes paires de nœuds du réseau. Un réseau dont la longueur moyenne du plus court chemin est faible signifie que la connectivité du réseau est très efficace (Kanrak et al., 2019).

m_G représente le nombre de liens dans le réseau G , n_G le nombre de nœuds dans le réseau G . a_{ij} est une valeur binaire qui vaut 1 si les nœuds i et j sont connectés, 0 sinon. V indique l'ensemble de nœuds dans le réseau G et $d(s, t)$ le chemin le plus court entre s et t .

Source : Auteur.

Le graphe est analysé selon les deux topologies du réseau maritime² : l'espace L et l'espace P (Hu et Zhu, 2009). Dans le réseau de l'espace L, seuls les liens directs entre les ports sont pris en compte, tandis que dans l'espace P les liens "indirects" sont également considérés. Autrement dit, dans un service tel que "Singapour - Valence - Le Havre", le réseau de l'espace L inclura les liens "Singapour vers Valence" et "Valence vers Le Havre". Dans le réseau de l'espace P, ces deux liens seront également pris en compte, mais en ajoutant une connexion « Singapour vers Le Havre ». Ce dernier type de réseau permet de mieux refléter la réalité des connexions portuaires, car il est possible que les conteneurs en provenance d'un port ne soient pas tous chargés et/ou déchargés dans le port suivant.

3.2. Création de l'indice de connectivité géographique

Pour déterminer les composants de l'indice PLSCI, nous extrayons les informations de notre base de données pour 3 composants : A, C et E. Comme nous

² Afin d'analyser les deux réseaux, nous importons nos données sur le logiciel Gephi (Bastian et al., 2009), permettant ainsi de visualiser la structure complète du réseau de transport maritime de porte-conteneurs. Nous utilisons aussi l'extension Python « NetworkX » afin de calculer les indices de réseau.

ne possédons pas le nom des compagnies maritimes pour chaque itinéraire mais seulement le nom des alliances, nous préférons ne pas estimer le composant D. Les composants B et F sont, quant à eux, estimés à partir de deux indices de théorie des réseaux. Précisément, nous utilisons le degré pondéré pour le composant B et le degré simple pour le composant F. Le PLSCI étant lui un indicateur trimestriel, nous avons calculé la moyenne des quatre trimestres pour les deux années observées afin d'obtenir un seul score de connectivité par année. En raison de l'indisponibilité de l'indicateur pour les ports d'Ilichevsk et de Meadville en 2007 et pour les ports de Nakhodka, Rodman et Bordeaux en 2016, ces ports sont exclus de notre analyse. Les résultats des calculs des composants sont présentés dans le tableau 2.

Le composant B prend la forme suivante :

$$B_G = \sum_i^N \left(\frac{365}{TR_{ij}} * NB_{ij} \right) * MTEU_{ij} \quad (5)$$

avec B_G le composant B du PLSCI pour le port i , TR_{ij} le nombre de jours pour qu'un porte-conteneurs effectue le service ij , NB_{ij} le nombre de porte-conteneurs déployés sur le service ij et $MTEU_{ij}$ le poids moyen, en EVP, des bateaux déployés sur le service ij .

Le composant F est calculé, lui, de la manière suivante :

$$F_G = \sum_j^N a_{ij} \quad (6)$$

avec F_G le composant F du PLSCI pour le port i et $\sum_j^N a_{ij}$ l'ensemble des liens uniques entre le port i et les autres ports du réseau.

Nous déterminons les divers niveaux de connectivité en fonction de la distance physique (en milles nautiques, noté nm), en nous basant sur l'étude de Tsiotas et Ducruet (2021). Les auteurs ont fait état, dans leur article, de différents niveaux de connectivité selon la distance des échanges en décomposant le réseau mondial de transport maritime par conteneurs en 32 zones. Leur travail a révélé trois principaux niveaux d'échelle géographique : la connectivité locale (C_L), définie par de courtes distances dans les échanges portuaires (< 600 nm), la connectivité internationale (C_{IN}) définie par des échanges mi-longes (1250-4500 nm) et la connectivité intercontinentale (C_{IC}) que l'on retrouve chez des ports internationaux grâce à la portée longue distance de leurs connexions (> 5000 nm). Ces segmentations ont été construites en décomposant les liens entre les ports et en observant l'évolution des degrés d'un graphe de 2016 grâce à l'analyse des différences de premier ordre. Il faut noter que les auteurs obtiennent une fragmentation différente lorsqu'ils observent séparément les degrés entrants et sortants. C'est en combinant toutes les observations qu'ils obtiennent les trois distances ainsi décrites.

Cette approche selon laquelle il existe différents types de connectivité va à l'encontre des indices de la CnuCED qui se concentrent sur la connectivité globale. Pourtant, il nous semble essentiel de distinguer les différents types de connectivité selon la distance géographique afin d'obtenir une vision plus précise de l'intégration des ports dans le réseau maritime.

La connectivité est ainsi divisée en trois intervalles, nous permettant de créer trois indices distincts :

- Connectivité locale (C_L) : [0 ; 600]
- Connectivité internationale (C_{IN}) : [1250 ; 4000]
- Connectivité intercontinentale (C_{IC}) : [5000 ; + [

Comme nous ne possédons pas les données de distance entre les ports, nous utilisons les coordonnées géographiques pour établir des rayons correspondant aux intervalles de connectivité. Nous calculons ces distances en milles nautiques comme dans l'article de Tsiotas et Ducruet (2021).

Tableau 2. Statistiques descriptives des composants du PLSCI

Variables	Obs.	Moyenne	Écart-type	Min.	Max.
2007					
PLSCI	195	260,1	273,5	7,4	1 674,7
A	195	543,3	779,8	34	6221
B (Espace P)	195	26 319	40 689	306	312 391
B (Espace L)	195	4 571	7 331	119	57 460
C	195	12	17,2	1	136
E	195	5186,8	2554,1	1 153	9 733
F (Espace P)	195	48,9	41,5	4	219
F (Espace L)	195	10,7	10,4	2	60
2016					
PLSCI	217	274,6	272,5	12,3	1 775,5
A	217	497,6	738,4	30	5254
B (Espace P)	217	48 814	84 189	316	602 478
B (Espace L)	217	7 100	12 523	177	89 102
C	217	11,4	16,7	1	118
E	217	8 654,2	4 547,8	1 819	18 270
F (Espace P)	217	56,1	46,9	3	228
F (Espace L)	217	10,5	10,3	2	72

Pour améliorer la lisibilité du tableau, le composant B a été divisé par 1000.

Source : Auteur. Données : CnuCED et Drewry Container Forecaster.

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1. Analyse du réseau maritime

Le transport maritime a connu une expansion spectaculaire au cours des dernières décennies. Ceci est en partie dû à mondialisation de l'économie, à la création de différents accords commerciaux et à la baisse globalisée du coût du fret

(Grossmann et al., 2007). Entre 2000 et 2008, le nombre de conteneurs transportés en mer a augmenté de 152 %. Cet essor a été interrompu par la crise financière de 2008 qui a considérablement affecté la demande mondiale, entraînant une diminution de 10 % du nombre de conteneurs transportés entre 2008 et 2009 (Cnuced, 2009). Par la suite, le volume en mer n'a cessé de croître. En 2016, le transport maritime a atteint 697 millions de conteneurs (Cnuced, 2017).

En 2007, les cinq principaux terminaux à conteneurs du monde étaient situés en Asie, affichant un volume de débit jusqu'à 50 % plus important que les principaux ports européens. Les ports de Singapour, Shanghai et Hong Kong avaient un débit de conteneurs deux fois supérieur au premier port européen Rotterdam (Cnuced, 2008) : 23 millions de conteneurs transités par leurs terminaux contre 10 millions pour le port hollandais. La route maritime la plus fréquentée n'était plus la route transpacifique, mais celle entre l'Asie et l'Europe. Entre 2006 et 2007, cette voie maritime a enregistré une augmentation de 15,5 % de son volume, atteignant un total de 27,7 millions de conteneurs transportés. La route Asie-Amérique du Nord a, quant à elle, connu une hausse de 2,7 % par rapport à l'année précédente, avec un volume de 20,2 millions de conteneurs transportés. Ce déplacement des flux commerciaux vers l'est du globe s'explique par deux facteurs principaux : le ralentissement de l'économie américaine, qui a réduit la demande des ménages et des entreprises, et les problèmes de congestion portuaire sur la côte ouest des États-Unis incitant les expéditeurs à détourner leurs navires vers la côte est du continent. Ces effets ont également été renforcés par l'augmentation de la demande des pays européens en 2007 (Cnuced, 2008).

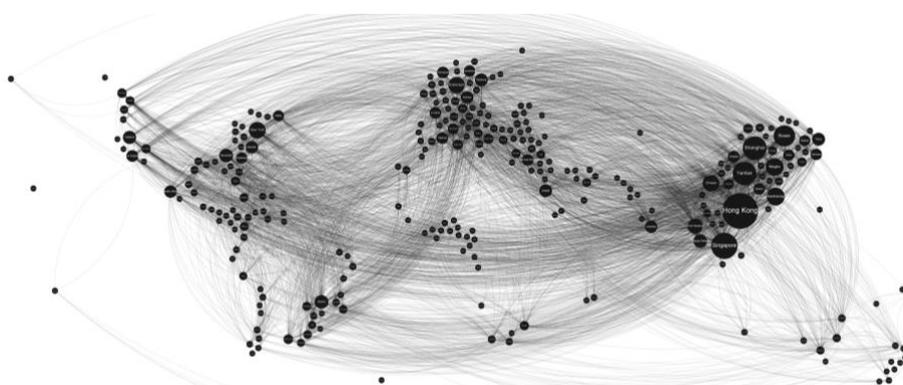
La prédominance des ports asiatiques est observable sur la figure 1. Dans notre réseau, Hong Kong est le port le plus important en termes de connectivité, suivi par Singapour et Shanghai. Sur les 10 premiers ports de notre classement, 8 sont situés en Asie, dont 6 en Chine (tableau 7 en annexe). Les deux ports non asiatiques à intégrer le top 10 sont le port de New York aux États-Unis et le port de Rotterdam en Europe du Nord, respectivement à la 8^e et 10^e position. D'autres ports non asiatiques tirent quand même leur épingle du jeu comme Jeddah au Moyen-Orient, Savannah en Amérique du Nord, Hambourg et Anvers en Europe du Nord, Valence et Barcelone en Méditerranée, et Santos en Amérique du Sud. Les ports d'Océanie et d'Afrique sont eux très peu connectés au reste du réseau.

La position de leader des ports asiatiques s'explique principalement par la croissance économique rapide de la région (+7,5 % contre 4,4 % pour le reste du monde) et par son intégration aux chaînes logistiques mondiales, en raison de son importante production de biens destinés à l'exportation. En 2007, la région a enregistré une hausse de ses échanges de 11,5 %, tandis que le reste du monde a connu, en moyenne, une augmentation de 5,5 %. La Chine, elle, a observé une croissance de ses échanges de 19,5 % (Cnuced, 2008).

Ces premières constatations permettent de mettre en évidence qu'il existe une hiérarchie portuaire au sein du réseau maritime mondial avec une forte

concentration du trafic en Asie. En fait, depuis l'introduction du système de « hub and spoke » permettant d'améliorer l'efficacité du transport conteneurisé (Konings, 2006), le trafic portuaire fait apparaître une disparité marquée : certains ports, comme les hubs internationaux tels que Singapour et Hong Kong connaissent une forte affluence des compagnies maritimes, tandis que le reste des ports affiche un niveau d'activité relativement faible. Cette observation est aussi illustrée dans la figure 2, où tous nos réseaux présentent une distribution des degrés pondérés sous forme de loi de puissance. Ce modèle de configuration portuaire, intitulé « scale-free network » est largement reconnu dans la littérature (Ducruet et al., 2021).

Figure 1. Réseau mondial de transport maritime de porte-conteneurs dans l'espace P (2007)



*Lecture : Plus le diamètre du nœud est important et plus son score de connectivité est important.
Source : Auteur. Données : Drewry Container Forecaster.*

En 2016, le transport maritime par conteneurs se remet progressivement de la crise économique de 2008. Mais l'excès d'offre de transport et le faible niveau de demande (Cnuced, 2017) entraînent de faibles taux de fret, ce qui restreint les marges des compagnies maritimes (Cariou et al., 2019). Ces entreprises connaissent ainsi des pertes importantes (plusieurs millions de dollars pour Maersk Line ou OOCL), ce qui conduit à des fusions-acquisitions de concurrents par certaines compagnies maritimes³ (Cnuced, 2017). Pour réduire les coûts, les armateurs réorganisent leurs routes, développent de plus grands navires et renforcent leurs alliances.

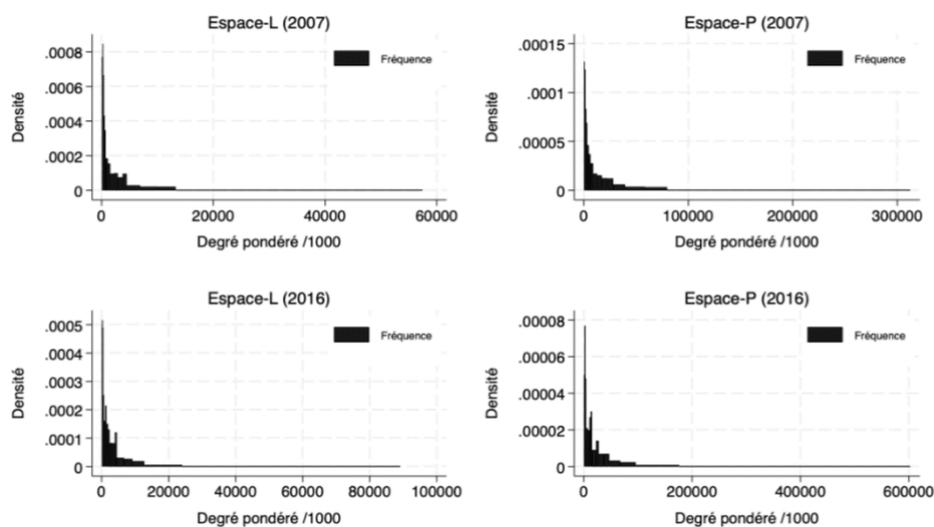
Tous ces éléments redessinent le réseau maritime mondial et entraînent une concentration des activités dans certains ports, clairement illustrée par les données du tableau 3. Ce dernier montre une réduction de la densité du réseau dans l'espace L, indiquant bien que le nombre de connexions portuaires directes a diminué entre 2007 et 2016, et cela malgré l'augmentation du nombre de liens (+ 9,2 %). Il sera

³ En 2016, Neptune Orient Lines (NOL) est racheté par CMA CGM et United Arab Shipping Company (UASC) est racheté par Hapag-Lloyd. En 2014, Hapag-Lloyd avait déjà acquis la Compañía Sud Americana de Vapores (CSAV).

donc plus difficile pour un port d'atteindre un autre port, car cela nécessitera davantage d'escales pour y parvenir. On peut donc en déduire une préférence des compagnies maritimes pour le renforcement des trajets port à port déjà existants, en augmentant la capacité déployée sur ces routes.

Il ne faut pas oublier que cela peut aussi être lié à l'augmentation du nombre de nœuds dans notre réseau (+11,1 %), ce qui réduit mathématiquement le nombre de degrés moyen par port. L'augmentation de la LMCC indique également que les distances directes entre deux ports ont augmenté, ce qui nécessite un recours plus fréquent aux hubs de transbordement portuaire. Ces interprétations ne signifient pas que la connectivité du réseau a diminué entre 2007 et 2016, mais il est indéniable que le recours aux hubs portuaires a augmenté.

Figure 2. Distribution des degrés pondérés pour tous les réseaux observés



Source : Auteur. Données : Drewry Container Forecaster.

Ces interprétations sont à mettre en perspective avec les résultats des indices de réseaux dans l'espace P. En effet, dans cette topologie, les indicateurs évoluent tous dans le sens inverse de ce qui a été mentionné précédemment. La densité du réseau et le nombre de degrés moyen augmentent, tandis que la LMCC diminue légèrement. Cela indique clairement une augmentation de la connectivité portuaire « indirecte » entre 2007 et 2016. En d'autres termes, en 2016, un conteneur aura, en moyenne, un accès plus large et plus facile aux différents marchés. L'augmentation de la connectivité « indirecte » peut s'expliquer par l'augmentation du nombre moyen de ports desservis par service (12,95 en moyenne pour 2016 contre 11,37 en 2007), ce qui a permis de connecter plus facilement les ports sur une même ligne maritime (tableau 6 en annexe). Ainsi, la densité du réseau a augmenté et la distance entre les ports s'est réduite.

Tableau 3. Principales variables des deux réseaux observés

	2007		2016		Variation (L)	Variation (P)
	Espace L	Espace P	Espace L	Espace P		
Caractéristiques						
Services	206	206	191	191	- 7,3 %	- 7,3 %
Nœuds	198	198	220	220	+ 11,1 %	+ 11,1 %
Liens	1 049	4 780	1 145	6 100	+ 9,2 %	+ 27,6 %
Indices						
Densité	0,027	0,123	0,024	0,127	- 11,1 %	+ 3,3 %
Degré moyen	10,6	48,3	10,4	55,5	- 1,9 %	+ 14,9 %
LMPC	3,806	2,204	3,842	2,119	+ 0,9 %	- 3,9 %
PLSCI						
A	543,3	543,3	497,6	497,6	- 8,4 %	- 8,4 %
B	4 508	26 300	7 011	48 200	+ 55,5 %	+ 83,3 %
C	12	12	11,4	11,4	- 5 %	- 5 %
E	5 186	5 186	8 582	8 582	+ 65,5 %	+ 65,5 %
F	10,6	48,3	10,4	55,5	- 1,9 %	+ 14,9 %

Le composant B a été divisé par 1000 pour une meilleure lisibilité.

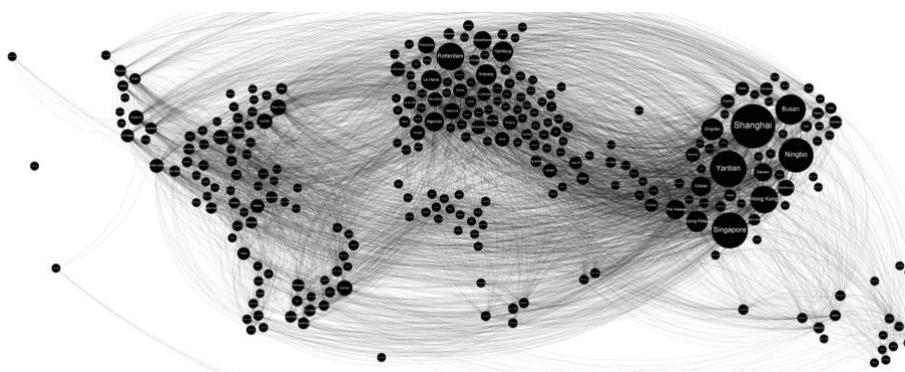
Source : Auteur. Données : CnuCED et Drewry Container Forecaster.

Enfin, selon la CnuCED et le PLSCI, la connectivité des ports de nos deux réseaux a augmenté en moyenne de 5,6 % entre 2007 et 2016. Pour comprendre cette augmentation, nous décomposons le PLSCI et examinons les tendances de ses composants (tableau 3). Comme Hoffman et al. (2024), nous observons seulement une augmentation des composants B et E entre les deux années considérées. Les trois autres indicateurs sont en baisse, reflétant la réponse opérationnelle des compagnies maritimes à la crise économique de 2008. L'augmentation de la connectivité du réseau de porte-conteneurs est principalement attribuable à l'expansion de la capacité déployée par les compagnies maritimes à l'échelle mondiale. Cette augmentation est stimulée par l'accroissement de la capacité de charge des navires, ce qui compense la diminution du nombre de services et de navires déployés.

Finalement, les contraintes économiques liées à la crise de 2008 ont poussé les armateurs à réaliser des économies afin de prospérer sur le marché du transport maritime. Ces économies ont pu être faites, entre autres, grâce à l'augmentation de la taille des navires et à l'allongement des services (augmentation du nombre de ports touchés et augmentation de la distance moyenne parcourue), mais aussi grâce à la diminution du nombre de services et du nombre de navires déployés. Ces contraintes ont obligé les transporteurs maritimes à utiliser plus régulièrement des hubs de transbordement afin de couvrir un maximum de zone géographique et répondre aux attentes des clients. Le rallongement de la distance et du nombre de ports touchés, ainsi que la réduction de la vitesse (Cariou, 2011) ont fait augmenter le temps de transit moyen par service (tableau 6 en annexe).

Il serait certainement intéressant, dans une autre étude, de comparer l'évolution des scores de connectivité et des indicateurs du PLSCI entre les hubs portuaires et les ports desservant l'arrière-pays afin de déterminer s'il existe des divergences significatives. Cela pourrait permettre de comprendre si l'augmentation de la connectivité portuaire s'est concentrée autour de quelques ports ou si une majorité de ports ont pu profiter de l'augmentation des volumes conteneurisés transportés.

Figure 3. Réseau mondial de transport maritime de porte-conteneurs dans l'espace P (2016)



Source : Auteur. Données : Drewry Container Forecaster.

4.2. Un indice de connectivité géographique

L'hypothèse selon laquelle il existe une hétérogénéité dans l'accroissement de la connectivité des ports du réseau de transport de conteneurs nous amène à penser qu'il pourrait exister différents types de connectivité pour un port. En effet, un hub de transbordement est, par nature, mieux connecté à des ports lointains qu'un port qui dessert seulement l'arrière-pays. En prenant la distance physique comme critère pour la connectivité, nous pouvons ainsi créer une donnée intéressante à observer pour les autorités portuaires, les décideurs publics et les chercheurs.

Pour ce faire, nous décomposons le PLSCI afin de déterminer le composant qui s'en rapproche le plus. Par la suite, nous pourrions l'adapter à nos catégories de connectivité pour nos deux réseaux. Au vu des tableaux 4 et 5, nous choisissons de nous concentrer sur le composant B (la capacité déployée) pour deux raisons principales : tout d'abord c'est celui qui est le plus corrélé à l'indice de la CnuCED pour nos deux réseaux, et deuxièmement il est assez simple de calculer la connectivité en fonction des distances pour ce composant. Nous choisissons également de calculer cet indice dans la topologie de l'espace P car cela reflète mieux la réalité des connexions entre les ports.

Les résultats sont présentés dans les tableaux 7, 8 et 9 en annexe. Comme imaginé, les ports ayant une forte connectivité au niveau global ne possèdent pas forcément un niveau de connectivité important dans les 3 dimensions

géographiques retenues. Par exemple, en 2007, le port de Kaohsiung est peu connecté au niveau local, mais est beaucoup mieux connecté au niveau international et intercontinental. Le port d'Anvers est lui, au contraire, beaucoup mieux connecté au niveau local qu'au niveau international. En 2016, le port de Singapour est dans la même situation que Kaohsiung en 2007, avec un faible niveau de connectivité au niveau local (classé 28^e) mais plus élevé au niveau international et intercontinental. Comme illustration, nous avons choisi de visualiser les différents réseaux du port de Singapour en 2016. Ils sont présentés en figure 4.

Tableau 4. Tableau de corrélation de 5 des 6 composants du PLSCI (2007)

	PLSCI	A	B	C	E	F
PLSCI	1					
A	0,85	1				
B	0,87	0,98	1			
C	0,84	0,99	0,98	1		
E	0,65	0,56	0,62	0,56	1	
F	0,82	0,89	0,90	0,90	0,71	1

Source : Auteur. Données : Cnuced et Drewry Container Forecaster.

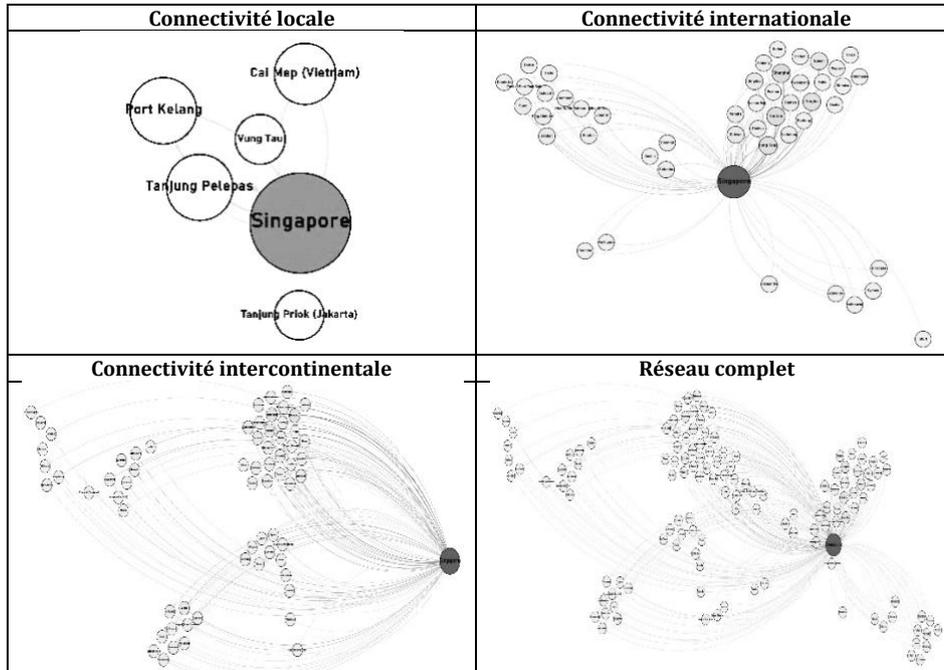
Tableau 5. Tableau de corrélation de 5 des 6 composants du PLSCI (2016)

	PLSCI	A	B	C	E	F
PLSCI	1					
A	0,87	1				
B	0,87	0,97	1			
C	0,87	0,99	0,97	1		
E	0,67	0,61	0,70	0,61	1	
F	0,80	0,90	0,87	0,91	0,70	1

Source : Auteur. Données : Cnuced et Drewry Container Forecaster.

Les différents réseaux du port de Singapour en 2016 mettent en évidence qu'il est peu connecté au niveau local, mais que cette connectivité augmente à mesure qu'il échange avec des ports éloignés. Cette tendance peut s'expliquer par le statut de hub international de Singapour, souvent privilégié par les compagnies maritimes pour leurs services internationaux. De plus, l'évaluation de la connectivité en fonction de la distance physique désavantage les ports situés loin d'autres ports, affectant ainsi leur score de connectivité locale. Au contraire, Anvers, étant proche de ports comme Rotterdam, Amsterdam, Bremerhaven, Le Havre ou Felixstowe, obtient plus facilement un score élevé. C'est aussi le cas de Santos, qui profite de la longue côte de l'est de l'Amérique du Sud pour se connecter à un grand nombre de ports sud-américains. Cela se reflète dans sa connectivité locale, où il se classe 10^e, alors qu'il est 38^e au niveau mondial. Cette tendance est également observée pour Long Beach sur la côte ouest des États-Unis, ainsi que pour Norfolk sur la côte est. D'autres ports obtiennent de bons classements au niveau intercontinental, mais sont nettement moins bien classés au niveau mondial. C'est le cas de Tanjung Pelepas en 2007, qui se classe 17^e au niveau intercontinental mais seulement 37^e au niveau mondial. On retrouve cette situation également pour des ports tels que Port-Saïd en Égypte ou Algésiras en Espagne.

Figure 4. Les différents réseaux du port de Singapour en 2016 selon nos indices de connectivité



Source : Auteur. Données : Drewry Container Forecaster.

En plus de révéler les fonctions des ports (Tsiotas et Ducruet, 2021), l'intégration de la distance physique dans les réseaux maritimes permet de comprendre, en détail, la connectivité des ports. Cela peut être une aide précieuse pour les autorités portuaires afin de connaître l'intégration de leur port dans le réseau maritime global. De plus, les autorités portuaires peuvent, par exemple, se comparer avec les ports situés à proximité géographique pour évaluer s'ils partagent la même stratégie de développement.

De plus, créer des indicateurs selon la distance des échanges permet d'être plus précis dans les résultats obtenus. Les chercheurs peuvent ainsi proposer de meilleures recommandations aux autorités portuaires ou aux décideurs publics. Par exemple, les études sur l'efficacité portuaire pourraient utiliser différents indices selon le type de connectivité au lieu d'un seul indicateur global.

5. CONCLUSION

Notre étude s'est intéressée au réseau mondial de transport maritime et en particulier au transport de conteneurs. En nous appuyant sur deux bases de données, nous avons analysé ce réseau complexe sous l'angle d'un facteur crucial pour le développement local : la connectivité maritime. Par la suite, nous avons décomposé l'indice portuaire de connectivité PLSCI afin d'extraire un des

indicateurs et de l'adapter à notre réseau. Nous avons ainsi été en mesure de comparer ce score de connectivité globale avec ceux introduits en nous appuyant sur les travaux de Tsiotas et Ducruet (2021), en vue de montrer qu'il existe différentes formes de connectivité en fonction de la distance des échanges.

La comparaison des réseaux selon les deux topologies de réseau maritime – l'espace L (liens directs entre les ports) et l'espace P (liens directs et indirects) – a révélé que le réseau maritime de porte-conteneurs est principalement connecté grâce à quelques ports internationaux. Ces ports agissent comme des hubs de transbordement, facilitant la connexion entre les ports du réseau. Entre 2007 et 2016, ce phénomène s'est amplifié. Bien que la connectivité des ports ait progressé durant cette période, cette augmentation découle principalement d'une hausse du nombre moyen de ports desservis par ligne maritime. À l'inverse, la connectivité « port à port » a diminué entre les deux années observées. La décomposition du PLSCI nous a également permis de comprendre que l'augmentation de la taille moyenne des porte-conteneurs a été un facteur crucial dans l'augmentation de la connectivité, alors que les nombres de navires et de services ont diminué.

Nos résultats montrent également, à l'instar des travaux de Bartholdi et al. (2016) ou de Martinez-Moya et Feo-Valero (2020), qu'il existe différentes méthodes de calcul de la connectivité. La décomposition qui a été effectuée de l'indicateur de connectivité en sous-indicateurs en fonction de la distance des échanges permet une meilleure compréhension des forces et des faiblesses des ports. En effet, un port bien noté dans le PLSCI ne dispose pas d'informations sur son niveau de connectivité géographique spécifique alors qu'il est possible, par exemple, qu'il soit fortement connecté au niveau international mais faiblement connecté au niveau local, tout en étant classé parmi les meilleurs dans le score global. Notre étude de cas sur le port de Singapour illustre cette situation.

On doit reconnaître que notre étude comporte quelques limites. Elle aurait pu être plus précise en suivant la méthodologie de la Cnuced pour calculer nos indicateurs de connectivité. De plus, on pourrait adapter les intervalles de distance en fonction de notre réseau en utilisant la méthodologie de Tsiotas et Ducruet (2021). Par ailleurs, l'étude porte sur les périodes 2007 et 2016. Il serait intéressant avec des données disponibles d'actualiser les analyses, le transport maritime ayant été affecté plus récemment par le Covid, les tensions géopolitiques, la guerre en Ukraine, la crise en mer Rouge, et la pression sur les compagnies maritimes en matière de décarbonation face aux enjeux climatiques.

Finalement, nous encourageons les organisations internationales à développer de nouveaux indicateurs de connectivité, car cela permettrait : *(i)* aux autorités portuaires de mieux appréhender la position de leur port dans le réseau international et *(ii)* aux chercheurs d'approfondir et d'apporter plus de précision dans leurs analyses sur la question.

ANNEXES

Tableau 6. Évolution des caractéristiques des services entre 2007 et 2016

	2007	2016	Évolution
Ports touchés	11,4	12	+ 5,3 %
Distance	18 559	19 733	+ 6,3 %
Temps de transit	52	65,2	+ 25,4 %

Source : Auteur. Données : Drewry Container Forecaster.

Tableau 7. Les 30 ports les mieux notés selon le PLSCI et leurs classements selon les composants choisis pour l'année 2007

Rang	Ports	B (PLSCI)	CL	CIN	CIC
1	Hong Kong	1	1	2	1
2	Singapour	2	24	1	4
3	Shanghai	3	5	5	3
4	Busan	5	20	114	5
5	Rotterdam	10	8	85	12
6	Anvers	23	6	46	6
7	Hambourg	17	4	26	8
8	Port Kelang	11	30	4	14
9	Ningbo	7	26	9	11
10	Yokohama	29	28	15	21
11	Kaohsiung	6	57	12	9
12	Kobe	33	11	20	31
13	Bremerhaven	30	13	41	18
14	Nagoya	34	14	23	23
15	Qingdao	23	16	25	40
16	Tokyo	16	15	13	25
17	Yantian	4	2	3	2
18	Osaka	43	27	30	55
19	Jebel Ali	58	74	54	22
20	Le Havre	26	10	83	10
21	Xiamen	31	3	37	28
22	Xingang	42	49	32	71
23	Colombo	20	123	7	26
24	Barcelone	36	29	40	15
25	Valence	28	70	45	24
26	Felixstowe	25	17	82	20
27	Tanjung Priok	139	123	76	142
28	Keelung	71	71	79	62
29	Laem Chabang	75	123	48	56
30	Jeddah	18	123	16	13

Source : Auteur. Données : CnuCED et Drewry Container Forecaster.

Tableau 8. Les 30 ports les mieux notés selon le PLSCI et leurs classements selon les composants choisis pour l'année 2016

Rang	Ports	B (PLSCI)	C _L	C _{IN}	C _{IC}
1	Shanghai	1	3	1	1
2	Singapour	3	28	4	4
3	Busan	5	23	152	5
4	Hong Kong	6	7	5	6
5	Ningbo	4	8	3	2
6	Port Kelang	14	46	11	15
7	Anvers	10	4	85	13
8	Rotterdam	7	1	67	9
9	Qingdao	8	2	7	12
10	Kaohsiung	19	49	13	14
11	Hambourg	11	6	23	16
12	Jebel Ali	45	105	108	41
13	Yantian	2	11	2	3
14	Xiamen	17	5	10	11
15	Yokohama	43	64	45	23
16	Xingang	38	55	19	22
17	Shekou	51	43	24	32
18	Kobe	64	24	39	52
19	Tokyo	63	33	88	72
20	Colombo	39	106	15	50
21	Bremerhaven	16	10	165	20
22	Laem Chabang	113	155	76	71
23	Kwangyang	41	31	33	42
24	Tanjung Pelepas	9	20	6	8
25	Nagoya	60	27	43	45
26	Cai Mep	59	155	20	46
27	Dalian	37	85	64	30
28	Valencia	20	52	21	21
29	Le Havre	12	12	57	7
30	Chiwan	13	13	9	10

Source : Auteur. Données : Cnuced et Drewry Container Forecaster.

Tableau 9. Les 5 premiers ports et les 5 derniers selon les différents classements de connectivité**2007**

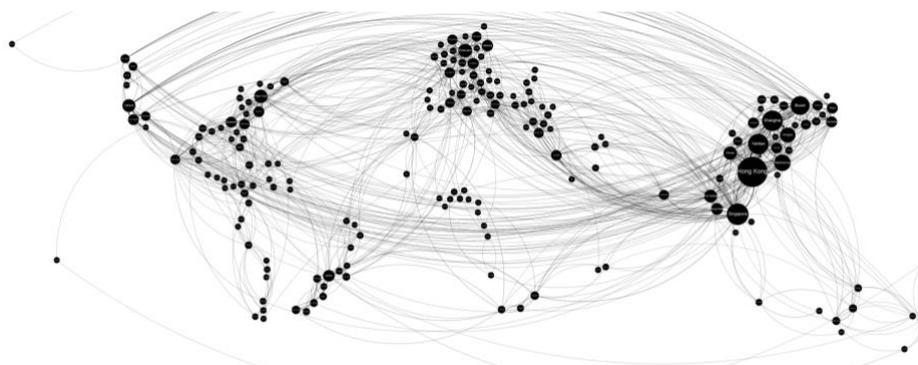
Rang	PLSCI	B	C _L	C _{IN}	C _{IC}
1	Hong Kong	Hong Kong	Hong Kong	Singapour	Hong Kong
2	Singapour	Singapour	Yantian	Hong Kong	Yantian
3	Shanghai	Shanghai	Xiamen	Yantian	Shanghai
4	Busan	Yantian	Hamburg	Port Kelang	Singapour
5	Rotterdam	Busan	Shanghai	Shanghai	Busan
...
191	Portsmouth	Luanda	Halifax	Rouen	Cagliari
192	Richmond Va	Chester	Melbourne	Boston	Ensenada
193	Chester	Tin Can Island	Altamira	Arica	Dutch Harbor
194	San Antonio	Mersin	Miami	Dunkirk	Tampa
195	Kumai	Richmond Va	Cristobal	Hakata	Kumai

2016

1	Shanghai	Shanghai	Rotterdam	Shanghai	Shanghai
2	Singapour	Yantian	Qingdao	Yantian	Ningbo
3	Busan	Singapour	Shanghai	Ningbo	Yantian
4	Hong Kong	Ningbo	Anvers	Singapour	Singapour
5	Ningbo	Busan	Xiamen	Hong Kong	Busan
...
207	Dutch Harbor	Bata	Casablanca	Dammam	Douala
208	Corinto	Sendai	Las Palmas	Mersin	Malabo
209	Malabo	Papeete	Conakry	Timaru	dTakoradi
210	Timaru	Nelspon	Dakar	Noumea	Nakhodka
211	Bata	Timaru	Douala	Papeete	Vostochny

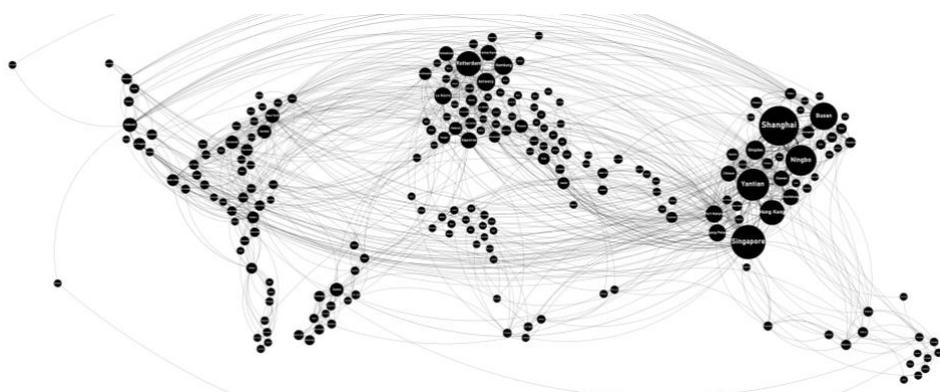
Source : Auteur. Données : Cnuccd et Drewry Container Forecaster.

Figure 5. Réseau mondial de transport maritime de porte-conteneurs dans l'espace L (2007)



Source : Auteur. Données : Drewry Container Forecaster.

Figure 6. Réseau mondial de transport maritime de porte-conteneurs dans l'espace L (2016)



Source : Auteur. Données : Drewry Container Forecaster.

RÉFÉRENCES

- Bartholdi, J. J., Jarumaneeroj, P., & Ramudhin, A.**, 2016, A new connectivity index for container ports. *Maritime Economics & Logistics*.
- Bastian, M., Heymann, S., & Jacomy, M.**, 2009, Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks. *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*, 3(1), 361-362.
- Baştuğ, S., Haralambides, H., Esmer, S., & Eminoğlu, E.**, 2022, Port competitiveness: Do container terminal operators and liner shipping companies see eye to eye? *Marine Policy*, 135, 104866.
- Calatayud, A., Palacin, R., Mangan, J., Jackson, E., & Ruiz-Rua, A.**, 2016, Understanding connectivity to international markets: A systematic review. *Transport Reviews*, 36(6), 713-736.
- Cariou, P.**, 2011, Is slow steaming a sustainable means of reducing CO2 emissions from container shipping? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(3), 260-264.
- Cariou, P., Parola, F., & Notteboom, T.**, 2019, Towards low carbon global supply chains: A multi-trade analysis of CO2 emission reductions in container shipping. *International Journal of Production Economics*, 208, 17-28.
- Carrese, S., Petrelli, M., & Renna, A.**, 2022, A new approach for the identification of strategic Italian ports for container traffic. *Transport Policy*, 120, 47-55.
- Ducruet, C., Berli, J., Spiliopoulos, G., & Zissis, D.**, 2021, Maritime Network Analysis: Connectivity and Spatial Distribution. In A. Artikis & D. Zissis (Éds.), *Guide to Maritime Informatics* (299-317). Springer International Publishing.
- Ducruet, C., Lee, S.-W., & Ng, A. K. Y.**, 2010, Centrality and vulnerability in liner shipping networks: Revisiting the Northeast Asian port hierarchy. *Maritime Policy & Management*, 37(1), 17-36.
- Ducruet, C., & Notteboom, T.**, 2012, The worldwide maritime network of container shipping: Spatial structure and regional dynamics. *Global Networks*, 12(3), 395-423.
- Fugazza, M., Hoffmann, J., & Razafinombana, R.** (2015), Building a dataset for bilateral maritime connectivity, *Région et Développement*, 41, 101-124.
- Fugazza, M., & Hoffmann, J.**, 2017, Liner shipping connectivity as determinant of trade. *Journal of Shipping and Trade*, 2(1), 1.
- Grossmann, H., Otto, A., Stiller, S., & Wedemeier, J.**, 2007, Growth potential for maritime trade and ports in Europe. *Intereconomics*, 42, 226-232.
- Hu, Y., & Zhu, D.**, 2009, Empirical analysis of the worldwide maritime transportation network. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 388(10), 2061-2071.
- Hoffmann, J.**, 2005, Liner Shipping Connectivity. CNUCED, CNUCED Transport Newsletter. United Nations Conference on Trade and Development, Geneva.
- Hoffmann, J., Rodriguez, L., Salo, B., & Teodoro A.**, 2024, New context calls for changing how we measure maritime connectivity, CNUCED Transport Newsletter. United Nations Conference on Trade and Development, Geneva.
- Jamain, R. E., Zakaria, R. H., & Mohd Satar, N.**, 2022, The Importance of Logistics Variables on Port Performance Analysis: A DEA Approach to Analyzing 57 Ports in the World Port Ranking. *Journal of International Business, Economics and Entrepreneurship*, 7(2), 1.
- Jarumaneeroj, P., Ramudhin, A., & Barnett Lawton, J.**, 2023, A connectivity-based approach to evaluating port importance in the global container shipping network. *Maritime Economics & Logistics*, 25(3), 602-622.

- Jiang, J., Lee, L. H., Chew, E. P., & Gan, C. C.**, 2015, Port connectivity study : An analysis framework from a global container liner shipping network perspective. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 73, 47-64.
- Kaluza, P., Kölzsch, A., Gastner, M. T., & Blasius, B.**, 2010, The complex network of global cargo ship movements. *Journal of The Royal Society Interface*, 7(48), 1093-1103.
- Kang, L., Wu, W., Yu, H., & Su, F.**, 2022, Global Container Port Network Linkages and Topology in 2021. *Sensors*, 22(15), 5889.
- Kanrak, M., Du, Y., & Nguyen, H.-O.**, 2019, Maritime Transport Network Analysis : A Critical Review of Analytical Methods and Applications. *Journal of International Logistics and Trade*, 17, 113-122.
- Kleinberg, J.M.**, 1999, Authoritative Sources in a Hyperlinked Environment. *J. ACM*, 46, 604-632.
- Konings, R.**, 2006, Hub-and-Spoke Networks in Container-on-Barge Transport. *Transportation Research Record*.
- Kumar, S., & Hoffmann, J.**, 2002, Globalisation: The maritime nexus. *Handbook of Maritime Economics and Business*
- Lam, J. S. L., & Yap, W. Y.**, 2008, Competition for transshipment containers by major ports in Southeast Asia : slot capacity analysis. *Maritime Policy & Management*, 35(1), 89-101.
- Li, W., Bai, X., Yang, D., & Hou, Y.**, 2023, Maritime connectivity, transport infrastructure expansion and economic growth : A global perspective. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 170, 103609.
- Limao, N.**, 2001, Infrastructure, Geographical Disadvantage, Transport Costs, and Trade. *The World Bank Economic Review*, 15(3), 451-479.
- Lun, Y. H. V., & Hoffmann, J.**, 2016, Connectivity and trade relativity : The case of ASEAN. *Journal of Shipping and Trade*, 1(1), 11.
- Martínez-Moya, J., & Feo-Valero, M.**, 2020, Measuring foreland container port connectivity disaggregated by destination markets : An index for Short Sea Shipping services in Spanish ports. *Journal of Transport Geography*, 89, 102873.
- Martínez-Zarzoso, I., & Wilmsmeier, G.**, 2008, Determinants of maritime transport costs – a panel data analysis for Latin American trade. *Transportation Planning and Technology*, 33(1), 105-121.
- Michael, O. O.**, 2019, Assessing the Contribution of Containerization to the Development of Western Ports, Lagos Nigeria. *Journal of International Logistics and Trade*, 17(1), 12-20.
- Notteboom, T., & Rodrigue, J.-P.**, 2008, Containerisation, Box Logistics and Global Supply Chains : The Integration of Ports and Liner Shipping Networks. *Maritime Economics & Logistics*, 10(1-2), 152-174.
- Oliveira, G.F., & Cariou, P.**, 2015, The impact of competition on container port (in)efficiency. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 78, 124-133.
- Pan, J.-J., Zhang, Y.-F., & Fan, B.**, 2022, Strengthening container shipping network connectivity during COVID-19 : A graph theory approach. *Ocean & Coastal Management*, 229, 106338.
- Radelet, S., & Sachs, J.**, 1998, Shipping Costs, Manufactured Exports, and Economic Growth. Mimeo. Presented at the American Economics Association annual meeting.
- Ramos, L. M., Zarzoso, I. M., García, E. P., & Wilmsmeier, G.**, 2006, Determinantes de los costes de transporte marítimos: el caso de las exportaciones españolas. *Informacion Comercial Espanola*, 79-94.
- Rødseth, K. L., Holmen, R. B., Kuosmanen, T., & Schøyen, H.**, 2023, Market access and seaport efficiency : The case of container handling in Norway. *Journal of Shipping and Trade*, 8(1), 8.

- Serebrisky, T., Sarriera, J. M., Suárez-Alemán, A., Araya, G., Briceño-Garmendía, C., & Schwartz, J., 2016**, Exploring the drivers of port efficiency in Latin America and the Caribbean. *Transport Policy*, 45, 31-45.
- Suárez-Alemán, A., Morales Sarriera, J., Serebrisky, T., & Trujillo, L., 2016**, When it comes to container port efficiency, are all developing regions equal? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 86, 56-77.
- Tovar, B., & Wall, A., 2022**, The relationship between port-level maritime connectivity and efficiency. *Journal of Transport Geography*, 98, 103213.
- Tsiotas, D., & Ducruet, C., 2021**, Measuring the effect of distance on the network topology of the Global Container Shipping Network. *Scientific Reports*, 11(1), 21250.
- United Nations, 2008**, Review of maritime transport.
- United Nations, 2009**, Review of maritime transport.
- United Nations, 2017**, Review of maritime transport.
- United Nations, 2023**, Review of maritime transport : Towards a green and just transition.
- Wang, Y., & Cullinane, K., 2016**, Determinants of port centrality in maritime container transportation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 95, 326-340.
- Wilmsmeier, G., & Hoffmann, J., 2008**, Liner Shipping Connectivity and Port Infrastructure as Determinants of Freight Rates in the Caribbean. *Maritime Economics & Logistics*, 10(1-2), 130-151.
- Wilmsmeier, G., Hoffmann, J., & Sanchez, R. J., 2006**, The Impact of Port Characteristics on International Maritime Transport Costs. *Research in Transportation Economics*, 16, 117-140.

Maritime connectivity : a multidimensional approach based on network theory

Abstract – Maritime connectivity poses a challenge for the development of ports and global maritime trade. This issue, studied since the early 21st century, has gained increasing importance, to the point where UNCTAD has established several indices evaluating the maritime connectivity of countries and ports. To understand port dynamics and the role of maritime connectivity in local development, this article analyzes port connectivity in the global context of the world container shipping network using network theory. By decomposing the Port Liner Shipping Connectivity Index (PLSCI), we analyze for the years 2007 and 2016 the role of each component: the number of ships, the deployed capacity, the number of services, the number of companies, the maximum ship size, and the number of direct connections relative to the global maritime transport network. Then, we integrate a geographical dimension by introducing a connectivity variable based on distance, starting from the hypothesis that there is not only one form of connectivity but several depending on the distance of exchanges. Our results show that some ports with high overall connectivity scores do not achieve high scores in all our categories, and vice versa. This analysis clearly underlines that connectivity cannot be simply considered as a global indicator.

Key-words

Maritime connectivity
Ports
Network theory
Local development
