

STRUCTURATION DES LIGNES MARITIMES RÉGULIÈRES DE NAVIRES PORTE-CONTENEURS

Olivier JOLY

Centre Interdisciplinaire de Recherches en Transports et Affaires Internationales
Université du Havre
Le Havre

Résumé

Les travaux en cours portent sur la structuration des réseaux de lignes maritimes régulières (conteneurs), propre à décrire les flux de conteneurs et leur permanence dans le temps et l'espace maritime. «Etablir un ensemble cohérent de mesures de réseaux maritimes (conteneurs)» pouvant être relié avec les mesures existantes de réseaux de transport terrestre (rail, route) était l'un des buts fixés pour commencer mes travaux sur la localisation des plates-formes logistiques en Europe du Nord-Ouest.

La méthodologie propose la construction d'indicateurs de mesures propres aux réseaux de lignes de conteneurs.

Mots Clés

Conteneur - Plate-forme logistique - Port - Réseaux

Cette communication présente la mise en place et les premiers résultats des méthodes d'analyse en cours sur les réseaux maritimes de lignes régulières de navires porte-conteneurs. Ce travail s'inscrit dans l'étude des réseaux de circulation à l'échelle internationale. Il correspond à l'un des axes de recherche du Centre Interdisciplinaire de Recherches en Transports et Affaires Internationales de l'Université du Havre. Cette recherche fait l'objet d'une thèse sur la localisation des plates-formes logistiques portuaires dans l'Europe du Nord-Ouest.

L'objectif immédiat est de fournir un ensemble de mesures propres à caractériser la structure des réseaux de lignes maritimes régulières. Il s'agit de disposer de mesures fiables et permanentes, décrivant la hiérarchie des nœuds (les ports) et la configuration géographique des réseaux par la mise en rapport des segments de relations hiérarchisés avec l'espace.

Pour caractériser le degré de permanence des flux entre les ports, autrement dit la structuration des réseaux de lignes maritimes régulières, on s'intéresse prioritairement aux échanges de marchandises diverses conditionnées en conteneurs. Ce choix se justifie par la nature trop irrégulière des autres trafics maritimes de marchandises. Les trafics de vrac liquides et solides bien qu'étant les plus importants en tonnages transportés, ne permettent pas, tant en termes de fréquence qu'en termes de ports de chargement/déchargement de dégager un service organisé en lignes régulières.

Enfin, l'intérêt scientifique du sujet porte sur la comparabilité des réseaux de transports terrestre et maritime, en intégrant les résultats obtenus dans une réflexion sur les places maritimes en tant que lieux d'intersection des réseaux de circulation continentaux et maritimes.

1. Méthodologie

1.1. Des navires aux ports - l'information initiale

Contrairement aux réseaux de transport terrestre dont les voies de circulation sont matérialisées par l'existence et la continuité d'infrastructures, comme les routes ou les voies ferrées reliant les points d'interconnexion des différents réseaux, sur les mer et les océans, l'absence d'infrastructures visibles de circulation hormis les chenaux d'accès portuaires, les balisages rapprochés des détroits, les canaux ou les zones d'attente portuaires peut faire oublier qu'il existe des routes maritimes empruntées par une majorité de navires. La détermination de ces voies de circulation maritime dont la connaissance n'est possible que de manière fragmentaire à partir des sources statistiques disponibles, et pour des aires géographiques particulières, a nécessité une étude fondée sur les déplacements des navires de commerce à l'échelle planétaire.

La source d'information utilisée : le Lloyd's Voyage Record est une publication hebdomadaire destinée aux armateurs. Elle permet de retrouver les routes maritimes à partir de la liste alphabétique des navires de commerce, tous types confondus, qui les empruntent. Elle fournit des prévisions d'escales pour chaque navire, portant sur une période maximale d'un mois et demi. Trois périodes de référence seront exploitées pour les années 1990, 1992 et 1994.

Pour cette recherche nous n'avons retenus que les navires porte-conteneurs, au nombre de 2 111 sur un total de plus de 16 000, tous types confondus.

Deux types principaux relevant des spécificités techniques de ces navires peuvent être dégagés :

- les navires porte-conteneurs intégraux, indépendamment de la capacité de charge réelle embarquée, mesurée en conteneurs, notées EVP (Equivalent Vingt Pieds) ;
- les navires mixtes non entièrement dédiés au transport de conteneurs maritimes, principalement des navires rouliers, et des cargos réfrigérés d'une capacité de transport réfrigéré conditionné en conteneurs supérieure à 80 %.

Il n'y a pas eu de sélection sur les ports concernés par les trafics maritimes de conteneurs. Le choix a été imposé par l'originalité de la source d'information. La disponibilité des données sous forme de séquences de touchées portuaires, c'est-à-dire de prévisions d'escales successives pour un navire donné, nous a obligé à prendre en compte la totalité des ports. Cette absence de contraintes sur les ports, telle que l'existence réelle et effective de terminaux à conteneurs, a fait apparaître un ensemble international de plus de 1000 places portuaires, sans aucune hiérarchie ou typologie a priori.

Les données originales, sur support papier, ont été enregistrées dans des fichiers de type base de données (Dbase III+). La structure de ces fichiers est organisée en champs pour chaque enregistrement répertorié (chaque navire sélectionné). Les prévisions d'escales successives sont identifiées sur une période allant de quelques jours, pour une seule escale prévue, à un peu plus d'un mois, pour 10 escales au maximum. Les différentes touchées successives sont généralement accompagnées d'une date abrégée, précision utile aux usagers de la publication originale : les armateurs.

Ce classement chronologique des touchées des 2 111 navires permet de répertorier les ports en tenant compte de leur mise en relation directe et effective par ces mêmes navires. Il arrivera qu'un port soit cité plusieurs fois quand plusieurs navires le desservent, ou bien quand un même navire y retourne régulièrement sur une courte période de temps. On reconnaîtra ainsi un certain nombre de liaisons directes ou de combinaisons de liaisons entre les mêmes ports.

1.2. Valuations et formatage des données

Chacun des 2 111 navires porte-conteneurs sélectionnés dans notre étude s'est vu attribuer une capacité de charge théorique embarquée (CCTE). Ce champ « capacité » apporte une information complémentaire, lorsqu'elle est disponible, sur les navires étudiés. Cette « capacité » identifie un nombre théorique de boîtes en EVP pouvant être embarquée par un navire, et ce, d'après les informations techniques fournies par l'armateur.

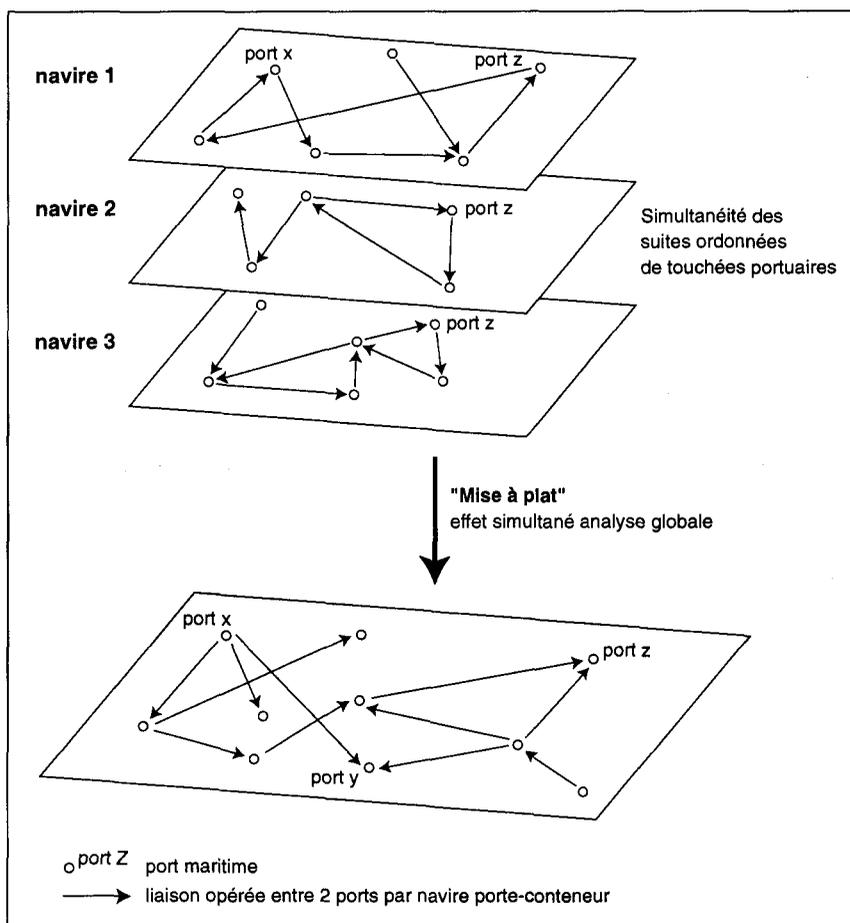
Il faut cependant noter que ceux des navires porte-conteneurs dont on n'a pu obtenir des renseignements précis et fiables sur leur capacité de charge respective, dans les registres de classification internationaux ont été toutefois pris en

compte dans nos travaux. Le champ «capacité» reçoit alors l'une des deux valeurs possibles : 0 pour les porte-conteneurs intégraux de capacité non identifiée, ou 1 pour les navires rouliers qui sont dans le même cas.

Les noms des ports ont été indexés et codés de 1 à 1008 sans tenir compte des indications datées de prévisions d'escales qui auraient empêché techniquement le codage des données. La disparition des dates relatives aux mouvements des navires, bien que pouvant être considérée comme une perte substantielle d'information, nous a permis de standardiser de façon efficace le codage de tous les ports. La simultanéité des mouvements observés sur une période étudiée, nous autorise de fait, à totaliser, c'est-à-dire à mettre sur un plan toutes les touchées portuaires ainsi que toutes les relations existantes (fig. 1).

Ces mouvements d'entrée/sortie simultanés et bornés dans le temps, relatifs à des individus statistiques identifiés ponctuellement ont été traités dans leur ensemble. Ainsi aucune différenciation due aux prévisions datées d'arrivée ou de départ pour les navires dans les ports n'a été gardée.

Figure 1 : De l'analyse mono-graphe à l'analyse du réseau dans son ensemble à l'échelle mondiale



1.3. Analyse structurelle des réseaux de lignes maritimes régulières : une application de la théorie des graphes

La théorie des graphes qui s'inspire principalement de la théorie des ensembles et de la recherche opérationnelle peut être considérée comme une méthode opérationnelle d'analyse des propriétés des graphes associés aux réseaux de transport. Les graphes pris comme des ensembles organisés de points nodaux et de liaisons internodales, permettent une représentation standardisée pour de multiples concepts abstraits et, en particulier pour celui de « relation ».

Nous considérerons le réseau mondial des lignes régulières de navires porte-conteneurs comme un ensemble de pôles et d'arcs, où :

- chacun des points nodaux représente un port ou une touchée portuaire au sens strict, disposant d'infrastructures propres au traitement des conteneurs, quel que soit le type d'installations à quai ;
- chaque liaison correspond à l'exploitation commerciale régulière d'un segment de route maritime.

Les pôles décrivent des situations diverses que l'on peut distinguer à partir des opérations de manutention sur les conteneurs. Le passage des lignes maritimes aux flux de conteneurs entre les multiples ports du monde est rendu possible. L'exploitation commerciale régulière d'une route maritime traduite ici par des suites ordonnées d'arcs, impose une conception orientée du graphe associé au réseau.

1.3.1. Orientabilité, contraintes fonctionnelles et pondérations

Par opposition au réseau routier dont le graphe associé peut presque toujours être considéré comme un graphe non-orienté, si l'on ne tient compte que des liens physiques, les routes maritimes empruntées par les navires ne constituent pas, dans leur ensemble, de liens physiques à quelques exceptions près. Ceci ne permet pas d'associer naturellement au graphe orienté des lignes maritimes, un graphe non-orienté. Toutes les liaisons d'un port à l'autre ne sont significatives qu'accompagnées de leur orientation propre. L'aspect morphologique du réseau n'intervient donc pas. C'est bien l'aspect fonctionnel qui est déterminant.

Le fait que deux ports soient touchés dans un ordre donné par un ou plusieurs navires et, dans un ordre rigoureusement inverse par d'autres navires sur la même période, ne pourrait changer en rien notre choix de graphe orienté. On ne peut éliminer définitivement les acteurs physiques qui engendrent et alimentent les relations.

Sur le plan de la méthode utilisée, la valuation des liaisons interportuaires qui consiste à attribuer des caractéristiques quantifiables aux liaisons créées par les navires qui font escale d'un port au suivant, apporte une justification supplémentaire au concept de graphe orienté. Chaque arc du graphe associé au réseau est doté d'une extrémité initiale et d'une extrémité terminale. De cette façon, les ports, éléments constitutifs du réseau, deviennent à maintes reprises et pour certains d'entre eux, à la fois pôle-origine, intersection (nœud) ou pôle terminal. La représentation schématique des arcs et des pôles oubliera distances et positions relatives dans un référentiel donné, mais leur assignera des valuations ou pondérations individuelles utiles pour l'analyse.

1.3.2. Constitution de matrices

« L'utilité pratique de décrire un graphe donné par sa matrice associée est évidente lorsque l'on veut dénombrer les chemins du graphe qui satisfont à certaines conditions données » [1].

- Du tableau séquentiel à la matrice carrée

Le passage du tableau séquentiel original (comprenant 2 111 enregistrements en ligne, 12 champs par enregistrement) aux différents types de matrices carrées (1 008 lignes, 1 008 colonnes) a nécessité l'utilisation de moyens de calcul massivement parallèle. Les techniques algorithmiques d'élaboration des matrices ont été mises au point en Fortran 77. Une succession de traitements informatiques visant à tester, corriger et vérifier la validité des matrices, a été engagée.

Schématiquement, les séquences chronologiques de ports touchés par les navires ont été transcrites en matrices, dans lesquelles n'ont été retenues qu'un petit nombre de caractéristiques propres aux liaisons existantes entre deux touchées portuaires successives.

On a donc d'une certaine façon, désagrégé (découpé) les séquences en tronçons de longueur identique, pour constituer des tableaux matriciels dans lesquels, tout élément (i, j) situé sur la ième ligne et à la jème colonne, apporte une information sur la liaison port i/port j (fig. 2).

Figure 2 : Traitement matriciel de l'aspect « séquentiel » du réseau de lignes régulières : exemple avec deux navires
(Les ports sont codés en 3 chiffres)

Les tableaux séquentiels

Navire/Ports	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4	Port 5	Port 6	Port 7	Port 8	Port 9	Port 10
ACOR (c.c.) (Po)	704	834	491	483	704	834	491	483	982	834

Navire/Ports	Port 1	Port 2	Port 3	Port 4	Port 5	Port 6	Port 7	Port 8	Port 9	Port 10
Saint-Roch	8	194	477	025	295	111	036	750	477	479

Les matrices « d'incidence sommet/sommet » correspondantes :

1. sur ACOR, porte-conteneurs polonais

Matrice carrée 5x5 : 10 touchées dont 3 touchées doubles et 1 triple (3 fois 2 liaisons identiques codées par : 2)

	483	491	704	834	982
483	0	0	1	0	1
491	2	0	0	0	0
704	0	0	0	2	0
834	0	2	0	0	0
982	0	0	0	1	0

2. sur SAINT ROCH, roulier français

Matrice carrée 9x9 : 10 touchées dont 1 touchée double (aucune liaison multiple donc 9 liaisons simples)

	8	25	36	111	194	295	477	479	750
8	0	0	0	0	1	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	1	0	0	0
36	0	0	0	0	0	0	0	0	1
111	0	0	1	0	0	0	0	0	0
194	0	0	0	0	0	0	1	0	0
295	0	0	0	1	0	0	0	0	0
477	0	1	0	0	0	0	0	1	0
479	0	0	0	0	0	0	0	0	0
750	0	0	0	0	0	1	1	0	0

- Les trois types de matrices retenus

Trois types principaux de matrices carrées ont été élaborées (fig. 3) :

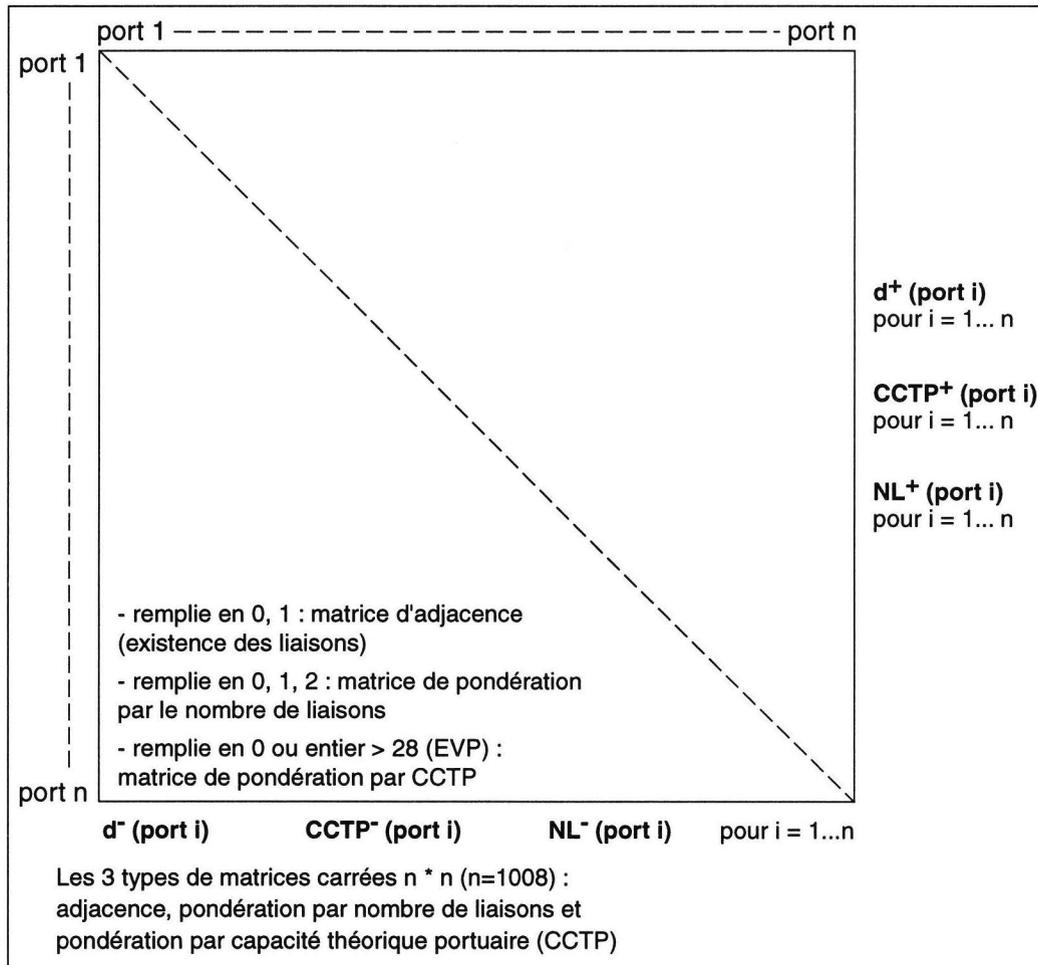
- Une matrice d'adjacence ou d'incidence sommet-sommet, remplie de 0 ou 1, pour l'absence ou l'existence d'une liaison engendrée par un navire ou plusieurs navires entre 2 touchées.

- Une matrice de pondération par le nombre de liaisons existantes entre 2 touchées. En effet, il arrive souvent que 2 ports soient reliés plusieurs fois par le même navire ou bien par plusieurs navires différents ; la matrice est remplie d'entiers naturels positifs.
- Une matrice de pondération par la capacité de charge théorique portuaire (CCTP), qui attribue une valeur au nombre d'arcs portés par une liaison entre 2 touchées successives ; la matrice est remplie d'entiers.

Par soucis d'homogénéité, les trois types de matrices construites se réfèrent au même nombre de ports ($n = 1\ 008$).

Le dernier type de matrice, dite de pondération par capacité de charge théorique portuaire apporte une information inédite sur la quantification des liaisons interportuaires, à l'échelle planétaire.

Figure 3 : Les trois types de matrices carrées $n \times n$



1.3.3. Les mesures élémentaires de réseau

« L'utilisation d'un ensemble de mesures propres à caractériser la structure d'un réseau de transport se place sur 2 niveaux. L'évaluation globale formalise le réseau tout entier pour en connaître les propriétés fondamentales ; l'évaluation locale privilégie les «cellules» du réseau, ses points d'entrée/sortie, ses connexions alternatives, etc. » [7].

Les premiers calculs mis en œuvre ont eu pour finalité de déterminer les principaux indicateurs utiles à notre analyse. Il s'agit d'un ensemble de mesures nécessaires à une analyse topologique ou géométrique du graphe représentatif du réseau. Cet ensemble regroupe deux grandes familles de mesures :

- des mesures globales pour une approche théorique de la configuration du réseau, sans tenir compte de la spécificité transport,
- des mesures d'éléments spécifiques au réseau de transport étudié.

- Les mesures globales - graphe orienté non planaire

- Le nombre d'arcs maximal d'un graphe G noté $q_{\max}(G)$ est le nombre d'arcs qu'il posséderait s'il était parfaitement connexe :

$$q_{\max}(G) = v \cdot (v - 1) / 2 \text{ si le graphe est non-planaire}$$

où : v = le nombre de sommets du graphe G.

- Le nombre cyclomatique μ ou nombre de circuits indépendants, est le nombre de circuits dont chacun comporte au moins un arc différent par rapport aux autres existants :

$$\mu = e - v + p \text{ où :}$$

e = le nombre d'arcs

v = le nombre de sommets

p = le nombre de sous-graphes partiels connexes non reliés (entre eux).

$$\mu = q_{\max}(G) - v + 1 \text{ si le graphe est parfaitement connexe.}$$

- Le nombre P(G) représente le nombre de composantes connexes d'un graphe G. Il est égal au nombre de sous-graphes partiels, connexes de G non reliés entre eux.

- L'indice α évalue le nombre de circuits indépendants de G par rapport au nombre de circuits indépendants du graphe G' parfaitement connexe ayant le même ensemble de sommets que G.

$$\alpha = 2 \mu / (v - 1)(v - 2) \text{ si le graphe est non-planaire}$$

avec $0 \leq \alpha \leq 1$

$\alpha = 0$ quand le graphe ne comporte aucun circuit : il s'agit d'un graphe en arbre ou composé d'arbres.

$\alpha = 1$ quand le graphe possède le nombre maximum de circuits possibles i. e. quand le graphe est «connecté» au maximum

α est une mesure du caractère plus ou moins maillé du graphe.

- L'indice β mesure la « complexité du graphe », puisqu'il donne le rapport du nombre d'arcs au nombre de sommets (v)

$$\beta = e / v$$

Il est évident qu'un graphe ayant un nombre e de points est d'autant plus complexe qu'il a un nombre important de liaisons. Ce lien entre le nombre de sommets d'un graphe et la valeur de β fait que ce dernier n'est utile que dans des comparaisons de graphes possédant le même nombre de sommets (ou le même nombre d'arcs).

La valeur de β peut servir à déterminer si un graphe est de type arborescent ($\beta < 1$) ou de type maillé (comportant au moins un circuit).

- L'indice γ est le rapport entre le nombre d'arcs existants d'un graphe G et le nombre d'arcs maximal du graphe parfaitement connexe ayant le même ensemble de sommets que G

$$\gamma = 2 e / (v (v - 1)) = e / q_{\max}(G) \text{ pour un graphe non planaire}$$

avec $0 \leq \gamma \leq 1$

La valeur de γ est d'autant plus grande que le nombre d'arcs du graphe est élevé. Il permet donc de comparer entre eux différents graphes, indépendamment de leur nombre de sommets.

- Indicateurs obtenus directement par lecture sur les matrices par sommations en ligne et en colonne, puis par sommation totale : lignes + colonnes (fig. 4)

- CCTP(Port i) : la capacité de charge théorique portuaire du port i, est construite par sommation des capacités portuaires à l'entrée (import : -), comme à la sortie (export : +) :

$$CCTP-(Port i) + CCTP+(Port i), i = 1 \dots n$$

– $d(\text{Port } i)$: le degré du port i dénombre pour ce même port, les autres ports auxquels il est relié à l'entrée (-) comme à la sortie (+) (le degré d'un sommet a_i noté $d(a_i)$ est le nombre d'arcs (ou d'arêtes) ayant a_i comme extrémité) :
 $d^-(\text{Port } i) + d^+(\text{Port } i), i = 1 \dots n$

– $NL(\text{Port } i)$: le nombre de liaisons du port i quantifie ses liaisons (même redondantes) avec les autres ports auxquels il est relié à l'entrée (-) comme à la sortie (+) :
 $NL^-(\text{Port } i) + NL^+(\text{Port } i)$

Figure 4 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus par sommations en ligne et colonne dans les trois types de matrice

PORTS	$d(\text{Port } i)$	$d^-(\text{Port } i)$	$d^+(\text{Port } i)$	$NL(\text{Port } i)$	$NL^-(\text{Port } i)$	$NL^+(\text{Port } i)$	CCTP(Port i)
Le Havre	88	39	49	270	135	135	389 669
Singapour	149	76	73	989	523	466	1 012 966

2. Premiers résultats et interprétation (période de référence : 1990)

2.1. Résultats et interprétation des calculs des mesures globales

2.1.1. Nombre d'arcs maximal

Le nombre d'arcs maximal du graphe G : $q_{\max}(G)$, est utile pour prouver la non-planarité du graphe R associé au réseau des lignes maritimes régulières de navires porte-conteneurs étudié.

En effet, d'après la théorie des graphes, si R était planaire, alors

$$q_{\max}(R) = 3(v - 2)$$

avec v = nombre total de ports pris en compte dans R , soit 1 008

$$q_{\max}(R) = 3 018$$

Or le nombre total de liaisons inter-port observées (tous ports pris en compte) de R est :

$$e_{\text{liaison}} = 10 340.$$

Donc $e_{\text{liaison}} > q_{\max}(R)$.

On en déduit la non-planarité du graphe R .

Remarque : $e_{\text{liaison}} = \sum_i d(\text{Port } i) = \sum_i [d^-(\text{Port } i) + d^+(\text{Port } i)]$

$$\text{avec } \sum_i d^-(\text{Port } i) > q_{\max}(R) \text{ et } \sum_i d^+(\text{Port } i) > q_{\max}(R)$$

On a : $q_{\max}(R) = v \cdot (v - 1) / 2$, si le graphe est non-planaire. Avec $v = 1008$, on trouve :

$$q_{\max}(R) = 507 528$$

On voit que dans ce cas :

$$e_{\text{liaison}} \ll q_{\max}(R)$$

Sachant que les dimensions de la matrice d'incidence sommet-sommet sont 1 008 x 1 008, on remarque que le réseau R est peu dense au sens du rapport liaisons existantes / liaisons potentielles.

Remarque : $e_{\text{liaison}} = \sum_i d(\text{Port } i) = \sum_i [d^-(\text{Port } i) + d^+(\text{Port } i)]$

$$\text{où } \sum_i d^-(\text{Port } i) \ll q_{\max}(R) \text{ et } \sum_i d^+(\text{Port } i) \ll q_{\max}(R)$$

2.1.2. Nombre de composantes connexes

Le nombre de composantes connexes du graphe R associé au réseau des lignes maritimes régulières de navires porte-conteneurs étudié est égal à :

$$P(R) = 7$$

La valeur de $P(R)$ est déterminée à partir de la matrice d'incidence sommet/sommet par un algorithme qui « marque » les relations de type : (port i / port j) en ne tenant pas compte des relations réciproques (port j / port i) quand elles existent (redondance des symétries).

On peut donc dénombrer seulement sept sous-ensembles de ports sur les 1008 pris en considération, n'entretenant pas entre eux de relation (par l'intermédiaire de navires porte-conteneurs). Le résultat obtenu, de sept sous-graphes partiels connexes non connectés entre eux témoigne de la forte connexité du réseau R étudié. Cette remarque est importante à l'échelle planétaire. La cohésion du réseau est beaucoup plus forte qu'elle n'était attendue.

Affiner l'étude sur chacune de ces composantes aide à caractériser les différents sous-réseaux du réseau mondial, mais demande de gros moyens informatiques en mémoire. Cette démarche ne nous paraît pas justifiée par l'organisation fonctionnelle (technico-commerciale) des lignes régulières de porte-conteneurs.

2.1.3. Nombre cyclomatique μ

C'est le nombre de circuits indépendants de R , c'est-à-dire le nombre de circuits (constitués de touchées portuaires réalisés par les porte-conteneurs) dont chacun comporte au moins une liaison différente par rapport aux autres existantes.

$$\mu = e_{\text{liaison}} - v + P(R) = 9\ 339.$$

$$\text{On a } \mu = 9\ 339 \ll q_{\text{max}}(R) - v + 1 = 506\ 521.$$

On en déduit que R n'est pas parfaitement connexe. Les liaisons inter-port ne sont pas toutes directes...

2.1.4. L'indice α

$$\alpha = 0,018$$

R ne possède pas le nombre maximum de circuits possibles.

2.1.5. L'indice β

β est un indice de connectivité, concept développé à partir des réseaux de circulation, qui mesure la complexité du graphe « maillé » R .

Deux résultats sont présentés :

$$\beta_{\text{liaison}} = e_{\text{liaison}} / v = 10,2$$

$$\beta_{\text{arc}} = e_{\text{arc}} / v = 27,1$$

$$\text{où : } e_{\text{arc}} = \sum_i \text{NL}(\text{Port } i)$$

Considérant les 1 008 ports d'escales, on voit que $\beta_{\text{arc}} / \beta_{\text{liaison}} = 2,6$

Il est utile de comparer les deux graphes R et R' .

R' est identique à R , mais on considère non plus $S_d(\text{Port } i)$ mais $S_i \text{NL}(\text{Port } i)$: c'est le graphe « fonctionnel » associé au réseau étudié.

Les informations fournies par $\beta_{\text{arc}} / \beta_{\text{liaison}}$ portent :

- sur le poids moyen des relations inter-port ($e_{\text{arc}} / e_{\text{liaison}}$). Le nombre moyen d'arcs portés par liaison inter-port est égal à 2,6. En moyenne, et pour l'ensemble du réseau, les ports sont reliés deux à deux par au moins deux navires.
- sur une sorte de « supra-connectivité », maillant le réseau fonctionnel et renforçant son caractère solidarisant vis-à-vis du système d'organisation technico-commerciale des lignes régulières de porte-conteneurs.

2.1.6. L'indice γ

γ est aussi un indice de connectivité. Il mesure l'importance des liaisons directes entre les ports indépendamment des liaisons indirectes, qui utilisent des escales. C'est le rapport entre le nombre total de liaisons (e_{liaison}) inter-port existantes dans R et le nombre maximum de liaisons théoriquement réalisables dans R .

$$\gamma = e_{\text{liaison}} / q_{\text{max}}(R) = 0,02$$

Seulement 2 % des 1 008 ports, éléments constitutifs du réseau des lignes régulières de porte-conteneurs sont reliés 2 à 2 en une et une seule touchée. Ce résultat mis en parallèle avec $P(R)$, le nombre de composantes connexes du réseau (7), montre la forte spécialisation distributive des ports à conteneurs. Il s'agit bien d'un réseau international de plates-formes logistiques portuaires. La collecte/redistribution des trafics maritimes de conteneurs est le fait d'une grande majorité de ports (à conteneurs) à l'échelle mondiale.

2.2. Résultats et interprétation des indicateurs directement obtenus sur les matrices

2.2.1. Ports « tête de lignes », ports « terminus », « simples touchées » portuaires et « ports articulés » ou plates-formes portuaires

Le degré du port i [$d(\text{Port } i)$] permet une partition des ports sélectionnés selon des critères fonctionnels de différenciation simples.

– *Les ports élémentaires : $d(\text{Port } i) < 3$, c'est-à-dire tels que $d(\text{Port } i) \in \{0, 1, 2\}$ où $i = 1, \dots, 1\,008$*

- Si $d(\text{Port } i) = 0$, c'est une erreur au niveau de la source originale et/ou des traitements qui ont été effectués, il s'agit d'un port considéré comme « hors réseau ». La prise en compte de ce type de ports influe sur le nombre de composantes connexes du graphe R .

19 ports « hors réseau » ont été dénombrés. Le calcul algorithmique du nombre de composantes connexes a été rectifié de 26 à 7, ce qui augmente sensiblement la connexité du réseau dans sa globalité.

- Si $d(\text{Port } i) = 1$, deux cas sont différenciés :

- $d^+(\text{Port } i) = 1$ et $d^-(\text{Port } i) = 0$. Il s'agit d'un port de type « tête de ligne », à partir duquel débute une arborescence (mais seulement à l'étape suivante). C'est le cas du port d'exportation.

- $d^+(\text{Port } i) = 0$ et $d^-(\text{Port } i) = 1$. Il s'agit d'un port de type « terminus », où aboutit une branche d'organisation fonctionnelle de ligne maritime en arborescence. C'est un port dédié à l'importation.

Il est clair que ces deux types de ports ne sont que des cas de figure théoriques, à un instant donné ; il n'y a pas de ports à conteneurs qui se spécialisent dans la génération spontanée de navires ou à l'inverse, dans le cimetière pour navires porte-conteneurs.

L'ensemble de ces ports à liaison unique, tels que $d(\text{Port } i) = 1$, regroupe 8 % du total.

- Si $d(\text{Port } i) = 2$ avec $d^-(\text{Port } i) = 1$ et $d^+(\text{Port } i) = 1$, il s'agit d'un port du type « simple touchée » ; c'est le port d'escale élémentaire : un navire à l'arrivée, un navire au départ. Dans la majorité des cas, il s'agit bien du même navire.

Les ports d'escale élémentaire ou simple touchée, avec deux liaisons, totalisent un peu plus d'un quart de l'ensemble des ports du réseau. Cette proportion influe à la baisse sur la densité du réseau.

– *Les ports articulés : $d(\text{Port } i) > 2$, c'est-à-dire tels que $d(\text{Port } i) \in [3, 171]$ où $i = 1, \dots, 1\,008$*

Il s'agit des « ports articulés » qui apparaissent comme des plates-formes logistiques de collecte et/ou de redistribution des conteneurs. La gamme des touchées directes, en import comme en export est relativement large. En effet, $\text{Max}_i[d(\text{Port } i)] = 171$, ce qui montre la grande variété des « ports articulés ».

Environ 63 % des ports sont articulés. Ce résultat, associé au nombre de composantes connexes montre la spécificité du réseau des lignes régulières de navires porte-conteneurs à l'échelle planétaire. Une imposante majorité des ports est constituée de plates-formes de redistribution des trafics. Cependant, ils n'interviennent pas dans cette redistribution de la même façon. Plusieurs techniques d'organisation de la desserte portuaire sont décelables directement à la lecture des capacités de charge théorique portuaire.

Le nombre des « ports articulés » représente la fragilité F du graphe R . Cette notion issue de la connexité. Elle permet de justifier topologiquement si la suppression momentanée d'un port (point nodal) peut dégrader la qualité globale de connexion du réseau, en augmentant sensiblement le nombre de sous-graphes connexes non connectés (par exemple : le port de Kobe en 1994).

2.2.2. Pondérations : nombre de liaisons, capacité de charge théorique portuaire

Deux indicateurs supplémentaires sont construits par combinaison des différentes valuations (pondérations) attribuées aux liaisons inter-port. Il s'agit des indices η et θ .

– L'indice h qui peut être déterminé de 2 façons :

$$\eta_1 = \sum_i (\text{CCTP}(\text{Port } i)) / d(\text{Port } i)^*$$

où $d(\text{Port } i)^* = \sum_i d(\text{Port } i)$ si $\text{CCTP}(\text{Port } i) \neq 0$ avec $i = 1, \dots, n$

$$\eta_2 = \sum_i (\text{CCTP}(\text{Port } i)) / \text{NL}(\text{Port } i)^*$$

où $d(\text{Port } i)^* = \sum_i \text{NL}(\text{Port } i)$ si $\text{CCTP}(\text{Port } i) \neq 0$ avec $i = 1, \dots, n$

On a $\eta_1 = 2\,204$ et $\eta_2 = 1000$. Soit en moyenne 2 204 équivalent vingt pieds (EVP) sont théoriquement transportés entre deux ports quelconques du réseau R . Le nombre moyen d'EVP transportés par liaison inter-port est égal à 1000. On peut en déduire la taille moyenne des navires porte-conteneurs en circulation à l'époque considérée.

Le rapport η_1 / η_2 est inférieur au rapport $\beta_{\text{arc}} / \beta_{\text{liaison}}$, puisque l'on tient compte des seuls arcs et liaisons inter-port qui correspondent aux navires identifiés intégralement par leur capacité de charge théorique (environ 374 liaisons sont exclues).

– L'indice θ est le rapport entre le réseau caractérisé par une mesure globale et le nombre de ses points nodaux. La mesure globale utilisée est la somme totale des capacités de charge théorique portuaire. θ mesure la capacité de charge moyenne par port. Il est possible de l'affiner en pondérant les ports par leur importance en termes de liaisons.

$$\theta = \sum_i (\text{CCTP}(\text{Port } i)) / v^*$$

où v^* : nombre total de ports qui reçoivent les navires porte-conteneurs dont la capacité de charge théorique est identifiée à partir des registres internationaux.

On trouve $\theta = 26\,631$ EVP/port. En moyenne, transitent par chaque port du réseau 26 631 EVP, sachant que la capacité moyenne des navires est de 1000 EVP et que, environ ($\beta_{\text{arc}} =$) 27.1 navires empruntent la même liaison inter-port. Les résultats sont cohérents mais nécessitent une analyse plus détaillée.

2.2.3. Nombre de lignes par port : cas des lignes régulières de navires de capacité supérieures à 3000 EVP

On a vu qu'il est possible de classer les ports maritimes en fonction de leur capacité de charge théorique portuaire (CCTP en EVP). On peut orienter notre choix sur les ports qui reçoivent plus particulièrement les lignes régulières de navires de grande capacité, à savoir ceux qui embarquent théoriquement plus de 3000 EVP (la capacité maximale en 1990 étant de 4300 EVP). Le graphe associé à ce sous-réseau contient environ 45 ports et 66 navires. Pour chaque port, on dénombre les lignes qui le desservent (noté : lignes/port). On remarque que les trafics sont globalement orientés Est-Ouest, avec 3 segments principaux : transatlantique, transpacifique et Extrême-Orient/Europe. Les principaux en-

semble littoraux concernés par les trafics transocéaniques de conteneurs sont les suivants (par ordre décroissant du total mondial de lignes/port) :

- l'ensemble Asie du Sud et Ouest-Pacifique,
- le Nord-Ouest européen (*northern range*),
- la côte Est des Etats-Unis et du Canada (Saint-Laurent),
- la côte Ouest des Etats-Unis,
- l'ensemble Méditerranée-Mer Rouge.

Si l'on compare ce classement portuaire, en termes de capacités théoriques, à celui des trafics effectifs enregistrés par les ports du monde et pour la même période, on note les différences les plus importantes pour les ports de la partie occidentale du segment transatlantique. Seul le port de New-York garde des positions similaires dans les 2 classements (selon les capacités théoriques et selon les trafics enregistrés par les autorités portuaires). Les 10 autres ports principaux de la façade est du continent Nord-américain sont absents des premières places du classement selon les trafics effectifs et, inversement, présents dans les premiers rangs du classement selon les capacités théoriques.

Un excédent de capacité de charge apparaît significativement pour ces mêmes 10 ports. Une nouvelle redistribution des trafics est ici mise en évidence (la tendance est perceptible pour l'année 1992, qui n'est pas traitée ici). Les circuits sont sensiblement réorganisés, de nouvelles plates-formes portuaires se constituent à partir d'infrastructures existantes. Le cas des ports de Charleston et de Hampton Roads, qui accusent un déficit d'une vingtaine de places entre les deux classements au profit des capacités théoriques, est géographiquement très significatif des graves problèmes de surcapacité qui affectent le segment transatlantique dans son ensemble.

Inversement, les 5 ports suivants : San Juan de Porto Rico, Dubaï, Bangkok, Manille et Seattle ne font pas partie des plates-formes portuaires spécialisées dans la redistribution des trafics induits par les navires de grande capacité (plus de 3000 EVP). Paradoxalement ils sont classés en très bonne position en termes de trafics effectifs enregistrés pour la période considérée. Bien qu'étant tous situés sur des routes maritimes importantes, ils totalisent environ 10 % du trafic total mondial tout en restant à l'écart du réseau des lignes transocéaniques. En fait, ils ne profitent que d'une desserte indirecte à partir d'autres ports de type plate-forme. Cependant leur importance régionale ne peut être remise en cause. Ils sont exploités sur des « niches portuaires », limitées à la fois géographiquement et en volume par des navires de capacité moyenne (1000-1500 EVP), mais qui restent localement fortement concurrentielles face aux lignes transocéaniques.

Les deux cas rapidement abordés ci-dessus à titre d'illustration, montrent clairement l'intérêt de disposer de plusieurs périodes de référence pour mesurer le degré de permanence des flux inter-port et observer les évolutions perceptibles dans la configuration géographique des réseaux de circulation maritime de conteneurs à l'échelle mondiale.

La redistribution des trafics maritimes de conteneurs peut être analysée sous l'angle de leur éclatement terrestre. En effet, le type et l'existence (ou l'absence) d'acheminement terrestre de conteneurs par rail, route, rail-route ou fluvial, participe grandement de la spécificité des ports. Ceux-ci sont perçus en tant que lieux d'intersection des réseaux de circulation continentaux et maritimes. Cependant de nouvelles techniques d'organisation de dessertes sont mises en place pour capter les nouveaux trafics. Elles peuvent conduire à des plates-formes portuaires d'interchange pur, caractérisées par une absence totale de desserte terrestre. Ces ports sont exploités uniquement pour des opérations de transbordement de navire à navire. L'interconnexion avec le terrestre a disparu !

Les travaux en cours s'inscrivent dans une période de croissance continue des échanges par conteneurs (les grands armateurs ont déjà commandé des navires géants, de capacité dépassant les 5 000 EVP) et s'orientent vers la notion « d'attractivité portuaire » en liaison avec l'interconnexion maritime-terrestre des réseaux de circulation de marchandises conditionnées en conteneurs.

Bibliographie

- [1] BERGE C. : *La théorie des graphes et ses applications*, Paris, Dunod, 1958
- [2] BROCARD M., JOLY O., STECK B. : Les réseaux de circulation maritime, *Mappemonde*, n° 1-1995, pp. 23-28
- [3] CATRAM : *Stratégies des grands armements conteneurisés et desserte terrestre du continent européen*, Paris, 1994
- [4] CHESNAIS M. : *Réseaux en évolution*, Caen, Paradigme, 1981
- [5] CRAINIC G., FLORIAN M., GEDEON C. : Determining origin-destination matrices and optimal multiproduct flows for freight transportation over multimodal networks, *Transportation*, 1993
- [6] GONDRAN M., MINOUX M. : *Graphes et algorithmes*, Paris, Eyrolles, 1990
- [7] JIANG J. : *Conception assistée par ordinateur des réseaux de transport, Modèle interactif graphique CRAPO*, Thèse de doctorat, Université de Paris XII, Val-de-Marne, 1993
- [8] KANSKY K.J. : *Structure of transportation networks*, University of Chicago, research paper n° 84, 1963