



HAL
open science

L'approche cartographique de la représentation du mouvement spatial. L'exemple des flux commerciaux maritimes euro- méditerranéens

Françoise Bahoken, Claire Lagesse, César Ducruet

► To cite this version:

Françoise Bahoken, Claire Lagesse, César Ducruet. L'approche cartographique de la représentation du mouvement spatial. L'exemple des flux commerciaux maritimes euro- méditerranéens. SAGEO 2016, Dec 2016, Nice, France. halshs-01622011

HAL Id: halshs-01622011

<https://shs.hal.science/halshs-01622011>

Submitted on 23 Oct 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'approche cartographique de la représentation du mouvement spatial. L'exemple des flux commerciaux maritimes euro-méditerranéens.

Françoise Bahoken¹², Claire Lagesse²³, César Ducruet²³

¹ Institut français des sciences et technologies des transports, des réseaux et de l'aménagement (IFSTTAR-AME / SPLOTT)

² Géographie-Cités / Équipe PARIS (UMR 8504)

³ Institut des Systèmes Complexes - Paris Ile-de-France (ISC-PIF)

RÉSUMÉ.

La cartographie du mouvement spatial implique une réflexion autour de la modélisation cartographique, complémentaire aux données numériques représentées. Elle ouvre ainsi une recherche sur la représentation des interactions et interrelations spatio-temporelles. Les approches existantes agissent soit sur le « fond de la carte » (aspects statistiques du traitement des données, en lien avec leur thématique) soit sur sa « forme », c'est-à-dire sur les aspects graphiques liés au tracé (edge bundling) et à la symbolisation (sémiologie graphique) du processus de représentation.

Cette communication a pour objectif d'examiner le rôle joué par le fond de carte dans la cartographie de flux s'exprimant par voie maritime. Purement géographique, l'approche diffère des précédentes en ce qu'elle approxime la représentation du mouvement en mobilisant un maillage de l'espace des flux. Trois possibilités sont présentées selon la manière dont l'espace – discret ou continu – formé des positions des couples de lieux d'origine et de destination, est mobilisé pour représenter des interactions spatiales (flux et mouvements).

ABSTRACT.

Mapping spatial movement implies to rethink cartographic modelling in addition to digital data issues. This opens research pathways about the representation of spatio-temporal interactions and interrelations. Existing approaches focus either on the map background itself (data analysis issues, to answer thematic questions) or on its "shape", i.e. on the pure graphical aspects of visualization (edge bundling) and on the semiology rules behind it. This paper aims to further examine the role of the map background in the cartography of maritime flows. This essentially geographic approach differs from existing ones in that it approximates the representation of movement by modelling the mesh of the space of flows. Three possibilities are presented according to how space (discrete or continuous; based on O-D pairs of places) is mobilized to represent spatial interactions (flows and movements).

MOTS-CLÉS : *matrice origine-destination, flux spatialisé, mouvement spatial, cartographie, maillage territorial, maillage spatial.*

KEYWORDS : *origin-destination matrix, spatialized flow, spatial movement, cartography, territorial mesh, spatial mesh*

1. Introduction

La cartographie de données de flux par voie maritime est généralement réalisée à l'échelle mondiale, dans le cadre d'approches qui sont soit réticulaires soit ponctuelles. Les premières s'inscrivent dans le champ de la théorie des graphes, elles assimilent pour cela la trajectoire des navires à un réseau spatial non valué, à une matrice de liens (Ducruet, 2015). On doit remonter à la cartographie du commerce maritime étatsunien à la fin des années 1930 par le géographe Edward L. Ullman (1949) pour trouver un exemple concret de ce genre. Les secondes mobilisent une approche individu-centrée sur les navires, à partir de l'analyse des observations de leurs positions dans l'espace-temps. Le plus ancien exemple connu est la carte d'André Siegfried (1940) de la position des navires de commerce britanniques sur le globe en 1937, prise à l'époque par M. Zimmermann (1940) ; « *l'aspect en est vraiment saisissant, ces points constituent des traînées qui soulignent merveilleusement la direction et l'importance des diverses [routes] maritimes mondiales* ». Il faut attendre les années 2000 pour que d'autres cartographies de ce type soient produites, par la reconstitution des trajectoires individuelles de navires, soit à partir de carnets de bord ou *ship logs* à des périodes plus anciennes (voir Garcia-Herrera et al., 2005), soit et plus généralement à partir de données AIS (*Automatic Identification System*) ou VMS (*Vessel Monitoring System*) (Le Guyader et al., 2011), à l'instar d'autres champs se focalisant sur les trajectoires d'objets mobiles dans un espace-support fixe (pour un synthèse récente, voir Buard et al., 2015). Enfin, les données satellitales comme les AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) ont également permis de cartographier la densité de navires sur le globe (Tournadre, 2014).

Lorsque l'information concerne un couple de ports d'origine et de destination (OD), la cartographie de ces flux est couramment réalisée selon une *logique de flux*, à l'exception notable des travaux historiques de C. J. Minard (1845-1877) qui mobilise un procédé distributif. Dans ce cas le carroyage a aussi pu être utilisé, consistant à compter le nombre

d'occurrences des arcs interportuaires par cellule de taille régulière sur le globe pour produire des cartes de densité (McKenzie, 1975). Il est à noter que l'approche *raster* a aussi été appliquée sur les données ponctuelles (AIS) suite à la reconstitution des trajectoires de navires, pour compléter la mesure de l'accessibilité mondiale et multimodale des villes (Nelson, 2008). Ces flux maritimes sont, en effet, représentés par une ligne droite tracée entre des couples de lieux d'origine et de destination (OD). Leur largeur est, très rarement, proportionnelle à une valeur (fréquence de déplacements ou quantités transférées) observée dans la période considérée. Cette logique présente la particularité de ne pas prendre en compte l'espace géographique dans le processus de représentation. Le flux se définit comme le transfert d'une quantité (d'individus ou de déplacements) nécessairement agrégée entre deux OD, son cheminement n'est pas connu avec précision, puisqu'il a été perdu lors des procédures de d'agrégation spatio-temporelles. L'espace sert le plus souvent de support à la représentation ou d'habillage, éludant les nombreuses contraintes topographiques liées aux déplacements. Il en résulte que la cartographie de flux, selon une *logique de flux*, est préjudiciable à la représentation de certains d'entre eux : par exemple, de ceux qui s'expriment à l'échelle mondiale et/ou par voie maritime.

Les flux maritimes, parce qu'ils sont localisés en mer, c'est-à-dire sur une surface continue bornée par un trait de côtes, lui-même ponctué de ports qui sont localisés à terre (en façade maritime) souffrent particulièrement de cette *logique de flux*. Leur représentation conduit à des cartes impossibles où les navires sont supposés franchir des espaces continentaux (Grataloup, 2011). Au-delà de cette question maritime, la spécificité des flux observés selon un mode de transport oblige à considérer l'infrastructure concernée. Il est dès lors intéressant de s'interroger sur la manière dont l'espace des positions (x, y) des OD peut être intégré dans le processus cartographique et cela, quelle que soit l'échelle d'observation. Ce questionnement interroge la mise en œuvre d'une *logique de mouvement* spatial, explorée notamment dans le cadre de flux aériens (Bahoken, 2016). Cette logique considère en effet la friction de l'espace (géographique) dans le processus de construction cartographique, en complément de sa modélisation.

L'objectif de cette communication est d'explorer différentes possibilités de géovisualisation des mouvements maritimes réduits au bassin euro-méditerranéen. Nous présentons dans un premier temps un état théorique de la question de la cartographie du mouvement spatial. Celui-ci nous conduit à revenir sur la proposition de J. Bertin (1973) de représenter de manière complémentaire des interactions et des relations spatiales. Dans un second temps, nous recourons à des matrices de flux commerciaux mondiaux élaborées dans le cadre du projet *World Seastems*. La reproduction de cette proposition et son enrichissement ouvrent la voie à de nombreuses variations cartographiques. Dans un troisième temps, nous présentons les possibilités de la cartographie des mouvements spatiaux, en focalisant l'attention sur les aspects cartographiques, ceux qui agissent sur le fond de carte, en complément éventuels des aspects graphiques et carto-statistiques.

2. Etat de la question

La question de la cartographie du mouvement spatial s'inscrit pleinement dans un cadre plus général de réflexion sur l'analyse du déplacement entre deux OD, situées dans un espace donné, pendant une période.

2.1. La cartographie du mouvement spatial

Le mouvement spatial, tout comme le flux, correspond à un changement de position, à un déplacement entre deux lieux symbolisé sur la carte par un lien. Lorsqu'il est enrichi d'une valuation, ce lien caractérise un flot figuré par une bande. Cette bande est par ailleurs orientée ou non, planaire si elle est affectée sur réseau, à une infrastructure de transport qui supporte le déplacement. Dans ce cas, le flux est planaire, il est caractéristique une mesure de trafic effectuée selon un mode de transport, routier par exemple. Ce trafic traduit de fait un mouvement de véhicules sur un tronçon d'axe routier formé par les OD, il ne traduit pas un flux au sens strict du terme.

Qu'il soit planaire ou non, la construction cartographique de ce flux consiste à agir sur la seule dimension de *largeur* de la bande, en application du principe de sémiologie cartographique spécifique à la variable visuelle taille. La construction cartographique du mouvement est d'ailleurs similaire. Il est possible de démontrer que la cartographie de flux est en réalité une approximation de la représentation du mouvement spatial, la différence entre les deux notions étant imputable à la manière dont l'espace des interactions est pris en compte dans l'analyse, et surtout dans l'interprétation de la carte (Bahoken, 2016).

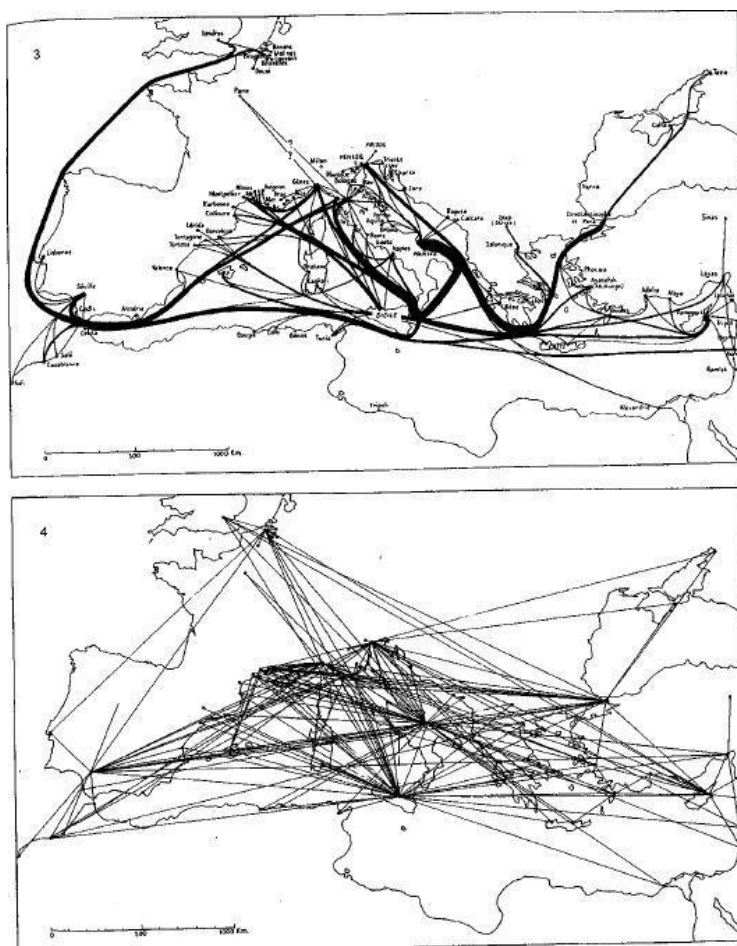
Ce questionnement intéresse des aspects sémiologiques, voire numériques de la construction du flux. Il peut être étendu aux aspects cartographiques relevant du fond de carte. En effet, le déplacement (flux, trafic ou mouvement), en tant que caractéristique intrinsèque du couple de lieux (Goodchild et al., 2007), peut également être interprété sur le plan graphique. Partant de là, il est possible de développer un raisonnement théorique et conceptuel sur la signification de la *longueur* du lien (exprimée en mm) perçu sur la carte, et ses conséquences en termes d'interprétation de la figure.

Si l'on considère les modalités de prise en compte de l'espace dans la réalisation d'une carte, la *longueur cartographique* du lien intéresse l'espace des positions des OD, autrement dit l'espacement relatif des lieux d'origine et de destination qui traduit une acception de la *distance parcourue* (Bahoken, 2016, pp. xxx) par la quantité en déplacement.

Cette posture introduit donc une réflexion sur la prise en compte de la composante spatiale dans la cartographie d'un *mouvement spatial*, par une action éventuellement menée sur la *longueur* du lien, conjointement à sa *largeur*, déjà mobilisée pour symboliser l'éventuelle valeur de la quantité dont il est question.

Il est important de noter que cette réflexion menée dans le cadre d'analyse des flux s'inscrit dans un champ plus large d'investigations qui a émergé au début des années 1970. Il vise à la prise en compte des concepts de distances-temps dans l'analyse des réseaux de transport. Les réflexions menées par W. Tobler (1979) dans sa thèse, puis par A. L'Hostis pour la construction de la carte en relief ou chronocarte par (L'hostis, xxx) ont en effet participé à la prise en compte de métriques spatiales et/ou temporelles dans la construction cartographique et cela, pour illustrer les recherches théoriques qui ont accompagné le développement des transports et la *révolution de la vitesse*. A. Bretagnolle (1995, 1996) décrit l'évolution de la carte qui s'en suit, pour illustrer ce changement de paradigme. On observe en effet le développement de cartes où l'approche cartographique – c'est-à-dire l'action menée sur les positions des lieux, sur le fond de carte – est privilégiée par rapport à des actions numériques (sur les données statistiques). Cela se traduit par le développement de procédés d'anamorphoses vectorielles (unipolaires et multipolaires) qui permettent de substituer à la métrique euclidienne traditionnelle des métriques réseaux ou de distance-temps ; aussi par des cartes en isolignes où la « [...] *représentation symbolique exprime le rapport au temps, par la superposition de lignes d'égal temps de transport, d'égale vitesse ou d'égale accessibilité* » (Bretagnolle, 2005 : 56).

Dans ce contexte des années 1970, on peut ainsi facilement imaginer que les réflexions menées par ses contemporains ont influencé J. Bertin (1973) dans le choix de cartes devant illustrer des flux commerciaux, en l'occurrence « *Les relations non orientées* » (Bertin, 1973 : 345), elles sont présentées sur la fig. 1.



3

Figure 1. Cartes illustrant des « relations non orientées », d'après (Bertin, 1973)

Les cartes de fig 1. représentent des flux commerciaux sur l'espace méditerranéen.

2.2. La proposition cartographique

La présentation de ces deux cartes, en apparence anodine, ne l'est pas en réalité. De quoi est-il question sur ces cartes ? Quelle est la raison pour laquelle Jacques Bertin met ces deux cartes en face à face ? Quelles(s) amélioration(s) ces cartes apportent-elles dans la compréhension des phénomènes cartographiés. Pour y répondre, il convient de revenir à ce qu'indique l'auteur à leur propos.

« (3) *Le commerce du blé en Méditerranée, au XV^e siècle (Mélanges L. FEBVRE, T. II, Paris, A. Colin, 2953). Il ne suffit pas de tracer les itinéraires réellement parcourus pour représenter un système de relation.*

Une carte des routes maritimes, même pondérée, ne montre pas l'orientation commerciale des centres d'activité. Elle montre la densité des bateaux en mer.

Les relations maritimes marchandes entre les villes de l'Europe et de la Méditerranée n'apparaissent seulement dans leur diversité, leur poids et leur orientation géographique que lorsque chaque relation, bien que maritime, est représentée par une droite (4) [sur la carte du bas] » (Bertin, 1973 : 344).

En dépit de l'impossibilité de répondre directement à ces questions, nous pouvons toutefois avancer deux hypothèses (Bahoken, 2016 : 172). La présentation de deux cartes, à visée complémentaire, pour cartographier une information similaire justifie l'idée de décomposer la matrice Origine-destination (OD) sous-jacente en sous matrices complémentaires, en même temps qu'elle la valide sur des flux affectés sur réseaux (des routes maritimes). La seconde hypothèse introduit la possibilité (carto)graphique de raisonner selon une *Logique de mouvement* – en complément éventuel d'une *Logique de flux* classique, ou d'une *logique de liens* – pour représenter des interactions spatiales (ici, la route de navires marchands en Méditerranée). A noter toutefois que la carte (4) de la Fig. 1 correspond formellement à une *Logique de liens*, l'information sur les flux ayant été dégradée à la seule existence d'une relation entre les ports.

Quoiqu'il en soit, cette proposition d'association de cartes élaborées selon deux logiques de raisonnement différentes, pour représenter des liens (approche Théorie des graphes) et des mouvements spatiaux (approche gravitaire), apparaît fondamentale. En effet, par rapport aux travaux antérieurs notre analyse diffère en ce sens qu'elle ne porte pas tant sur la prise en compte du temps de transport (ou de la vitesse) pour générer un espace relatif, cognitif... que sur l'expression raisonné des déplacements dans un territoire, compte tenu des contraintes liées à la représentation. En effet, nous raisonnons sur un espace géométrique assorti d'une métrique géographique, nous mobilisons une matrice des positions relatives dans un système de projection cartographique donné. L'objectif n'est pas tant de montrer la proximité des lieux liés à l'utilisation de tel ou tel mode de transport que de figurer le déplacement entre deux lieux – lié ou non à un mode de transport donné, compte tenu des contraintes physiques ou topographiques de déplacement. C'est pourquoi notre approche considère le rôle joué par la friction de l'espace (i.e. le frein de la distance) dans l'expression des mouvements spatiaux. Elle met en évidence d'une part l'importance théorique du détour et sa figuration sur une carte (Lhostis, 2015) et, d'autre part, valide par la même l'hypothèse de son existence. C'est pourquoi il ne s'agira pas tant ici de trouver le chemin le plus court sur le réseau formé des déplacements que d'explorer les différentes manières de représenter sur une carte le déplacement entre deux OD, compte tenu des possibilités techniques et technologiques actuelles.

C'est pourquoi notre posture nous conduit à nous interroger sur les spécificités des méthodes utilisées de cartographie utilisées pour représenter le mouvement, selon que l'on s'intéresse aux aspects graphiques ou non, aux aspects numériques ou que l'on introduit l'espace (et/ou le temps) dans le processus de construction cartographique. Le cas d'application est illustré par une extraction de la base de données issue des fichiers de la *Lloyd's List* (2008).

3. Présentation des données

D'après Francis Galton cité par A. Bretagnolle (2005), « *la ligne directe entre deux points de l'océan est rarement [jamais ?] la route la plus rapide pour les bateaux de commerce* ».

3.1. La base de données *Lloyd's List* (2008)

Les données sur lesquelles repose cette étude proviennent de la *Lloyd's*, compagnie d'assurance anglaise consignant les déplacements de l'ensemble des navires recensés à l'échelle mondiale, depuis le XVIII^{ème} siècle. La base de données constituée au sein du projet *World Seastems*, unique et innovante, regroupe les trajectoires de navires, quatre mois par an, entre 1977 et 2008. Chacune d'elle est décrite par un port de provenance (lieu d'origine), un port d'enregistrement (lieu de transit) et un port de destination (lieu de destination). En plus des données de trajectoires temporelles, la *Lloyd's List* regroupe des informations sur les navires (type, nom, propriétaire, drapeau...) et sur les ports (nom, pays, coordonnées géographiques, ...). Les données plus anciennes ont été numérisées à l'échelle mondiale, dans le cadre du projet, à partir de 1890.

Pour l'étude que nous présentons ici, nous considérons une échelle plus restreinte d'expression des flux maritimes, l'espace euro méditerranéen (EUROMED). En effet, l'échelle mondiale pose des problèmes spécifiques qui sont liés au choix du système de projection et à la manifestation de différents effets de position qui en découlent. Nous avons donc extrait les ports de la zone euroméditerranéenne et les trajectoires correspondantes, pour l'année 2008.

Nous avons construit, à partir du graphe des trajectoires, une matrice globale correspondant à cette échelle spatio-temporelle. Les nœuds sont les ports et il existe un arc entre deux nœuds si au moins un navire a réalisé la liaison entre les deux ports durant la plage de temps observée (l'année 2008). Cette matrice globale peut être découpée en catégories, les liens peuvent en effet être valués selon différents attributs, à savoir :

- le nombre de navires ayant effectué le trajet entre chaque couple de ports ;
- le tonnage total de marchandises échangées entre chaque couple de ports ;
- la distance (orthodromique) du trajet ;

La matrice globale est donc formée de cinq champs : les identifiants des lieux d'origine (i) et de destination (j) ; la distance kilométrique (Dij), une fréquence de navires circulant sur le trajet (Xij) et une quantité totale de marchandises transférée (Fij), entre (i) et (j), exprimé en tonnes. Ces deux derniers champs expriment un flux échangé entre deux ports.

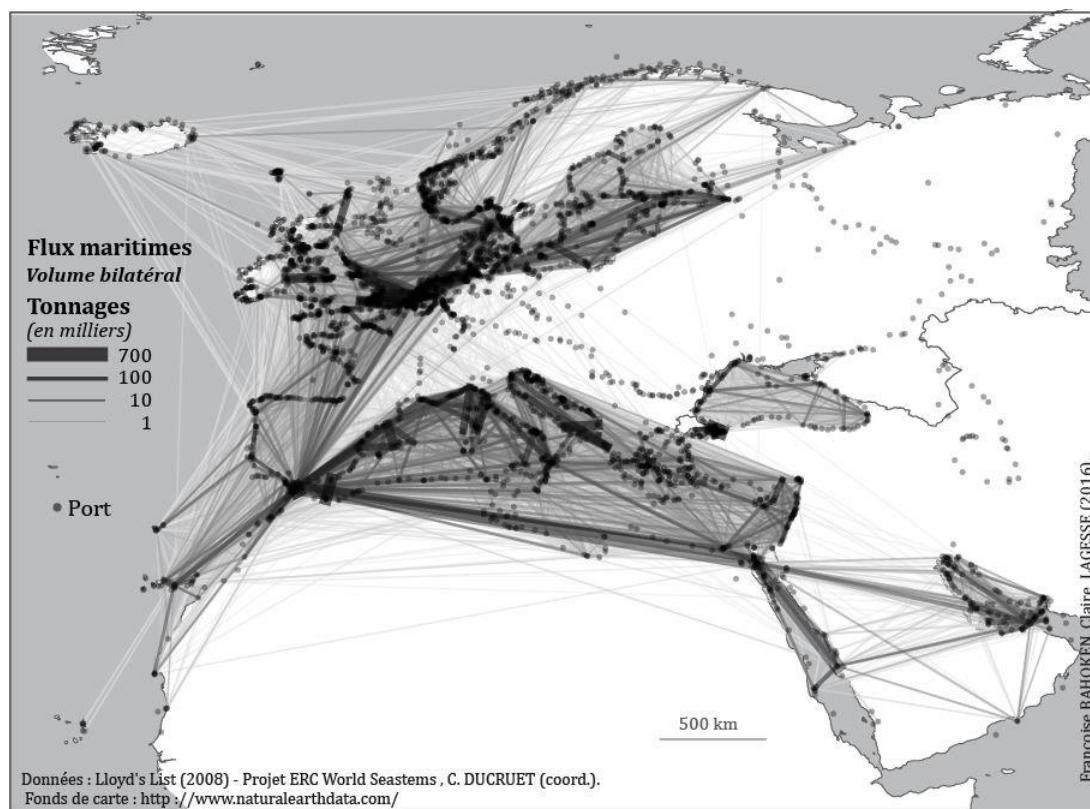
3.2 Décomposition des flux maritimes

La matrice globale étant orientée, nous l'avons décomposée de manière à ne considérer que sa composante symétrique (Fij⁺). Le graphe n'est donc plus orienté : une trajectoire du port A vers le port B sera considéré de la même manière que celle du port B vers le port A.

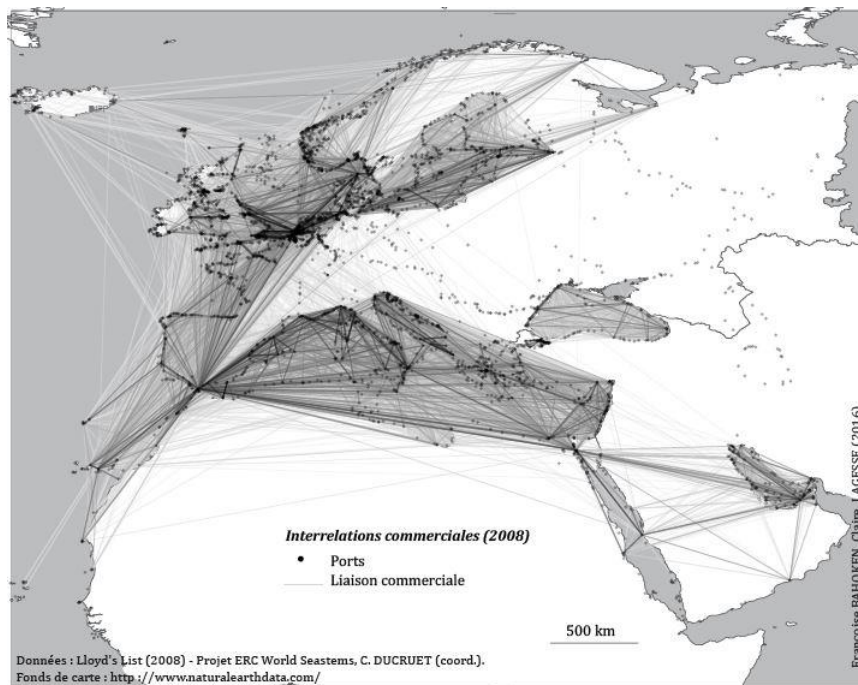
Les deux cartes de la Fig. 2 mettent en œuvre les suggestions de Jacques Bertin pour cartographier des matrices de « relations non orientées ». La première consiste à représenter les relations interportuaires par des traits droits et la seconde, des interactions spatiales par des bandes, au tracé sinueux, dont la variation de largeur est proportionnelle à la valeur du flux. Pour y parvenir, il convient de décomposer au préalable la matrice de flux observés, respectivement en matrice de liens (Lij) et de volume de flux bilatéral (Fij⁺) (Bahoken, 2016b).

Figure 2. Cartographie des liaisons et des interactions commerciales

a-



b-



Sur le plan cartographique, ces cartes sont générées dans le cadre de *Logique de liens* et de *flux*, dans le formalisme euclidien. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les flux sont représentés par un trait droit, les voies maritimes n'étant pas connues avec précision. Elles ne tiennent donc pas compte de l'espace d'expression de ces flux, en particulier d'éventuelles contraintes physiques (topographiques) au transport maritime qui les caractérise. Tout au plus peut-on identifier certains *hubs* portuaires, comme en Italie du Sud (Gioia Tauro) ou au Moyen Orient (Dubai), et certains passages stratégiques, comme Gibraltar ; enfin des zones de concentration (Benelux).

Il est important de noter que les deux cartes de la Fig. 1 proposées par Bertin décrivent bien la même information : des échanges commerciaux de blé (Fij). Elles diffèrent toutefois sur le plan de la sémantique puisque la première représente un volume total de mouvements spatiaux, tandis que la seconde décrit des relations (Lij) commerciales entre les ports méditerranéens, et est à ce sens similaire à la première carte proposée dans la Fig. 2. De ce point de vue, pour décrire les mouvements maritimes commerciaux de la Lloyd's, il convient de changer de logique de raisonnement ou de formalisme spatial.

La cartographie des mouvements conduit à la figuration de bandes sinueuses qui indiquent le tracé réel – ou approximé – des routes maritimes. Elle illustre de manière statique le mouvement approximativement réalisé par les navires franchissant la Méditerranée. La métrique mobilisée étant ici fonctionnelle, la sinuosité des figurés évoque bien l'itinéraire emprunté, en mettant en évidence l'importance du « détour » caractéristique de ces flux maritimes de port à port. Pour représenter correctement ces flux maritimes, il convient de limiter la représentation au domaine maritime (Fig. 1, carte 1) et non à le laisser franchir l'espace terrestre (Fig. 1, carte 2 et Fig. 2). A l'inverse, dans le second cas, la représentation des liens en aspect direct évoque une généralisation de ces mouvements, où seule la mise en relation des ports importe, cela indépendamment de leurs positions géographiques. La métrique mobilisée est nécessairement euclidienne. On peut ainsi considérer que la bande sinueuse, à l'inverse du lien, procure un effet visuel similaire à la courbe évoquée par Bertin, en donnant l'illusion de la continuité du déplacement des navires dans l'espace méditerranéen : elle « [...] donne l'idée de la continuité, les éléments se prolongent et sont liés. En sollicitant l'œil à suivre une courbe, même très tourmentée, le tracé de l'itinéraire retrouve son unité » (Bertin, 1973 : 437).

Ces résultats valident l'hypothèse générale selon laquelle la décomposition de la matrice a un effet direct sur la complexité graphique (sur la clarté de la figure) qui se répercute au niveau analytique (la perception des principaux motifs est améliorée). J. Bertin avait d'ailleurs suggéré l'importance de décomposer l'information de flux de lieux à lieux à représenter : « 1°) Les mouvements observés peuvent relier toute zone administrative à toute autre zone, et ceci dans les deux sens. Le seul réseau des mouvements orientés est donc très complexe. 2°) Ces mouvements doivent être pondérés en quantités absolues. [...] 1°) Représentation de la balance entre les deux sens [correspondant à (Fij)], ce qui divise le réseau par deux et évite les allers et retours. Mais la vision de la masse migrante disparaît [...] » (Bertin, 1973 : 437).

Nous proposons d'analyser les différentes possibilités de géovisualisation de ces flux et mouvements maritimes.

4. Les possibilités de la cartographie des mouvements maritimes spatiaux

La représentation cartographique du mouvement spatial peut être réalisée selon trois grandes familles de possibilités : numériques, graphiques et cartographiques. Elles caractérisent une action qui porte respectivement sur le fond de la carte, la forme de la carte et le fond de carte.

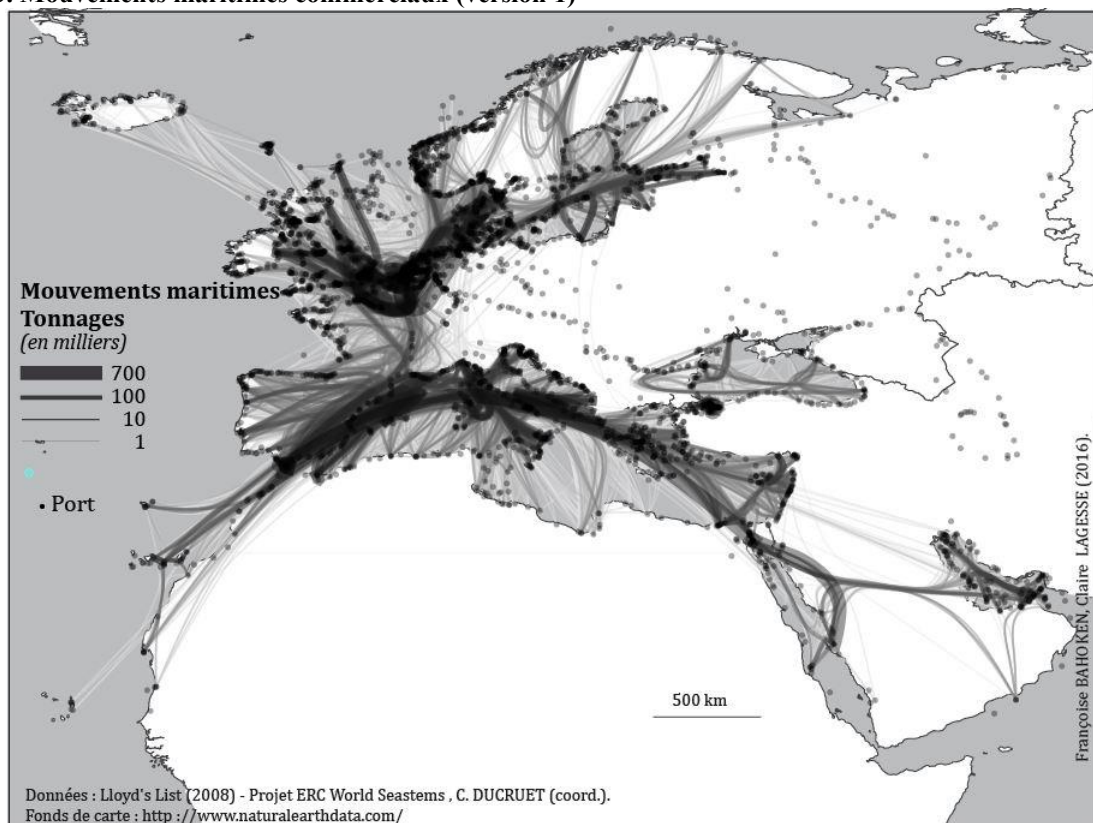
La première possibilité est à manier avec précaution, car elle mobilise les données numériques de manière à privilégier l'espace pour renforcer la perception du rôle joué par les contraintes au déplacement. Etant donné qu'elle conduit à la représentation de flux présentant des valeurs faibles mais de fréquences élevées, elle entraîne une survalorisation des mouvements importants qui s'expriment plutôt à longue distance, ce qui n'est pas le cas ici. C'est pourquoi elle ne sera pas examinée.

Nous présentons tour à tour les deux possibilités. La seconde d'entre elles est visuelle, elle caractérise une action réalisée sur les seuls aspects graphiques et/ou sémiologiques, pour donner une illusion du cheminement dans l'espace.

4.1. L'approche graphique de cartographie du mouvement

L'approche graphique consiste à simuler le mouvement, en agissant sur « la forme du tracé », c'est-à-dire sur la sémiologie et/ou sur la géométrie des liens. Dans le second cas, la méthode appartient à la famille des fusions graphiques de type *edge Bundling* (Holten et al, 2005). Mise en œuvre sur la Fig. 2, elle consiste à appliquer un angle aux tracés (l'aspect curvilinéaire donnant l'illusion d'un mouvement) puis à privilégier les valeurs les plus importantes dans l'objectif d'identifier les principales voies maritimes.

Figure 3. Mouvements maritimes commerciaux (version 1)



Si le résultat visuel obtenu est saisissant, deux inconvénients sont notables. Le premier d'entre eux est de ne pas suivre de route réelle. En effet, pour une orientation cardinale donnée, la fusion des liens dépend de la valeur du lien le plus important qui va ainsi servir de référence – la référence pouvant ici être assimilée à la voie principale –. Cette référence va contraindre l'attractivité des liens dans un voisinage donné, c'est-à-dire des flux qui présentent la même orientation générale mais dont la valeur est inférieure au lien de référence ; ces derniers seront alors comme aimantés au lien de référence. En revanche on se rapproche de la répartition réelle des grands corridors maritimes l'un méditerranéen, l'autre nordique.

Le second inconvénient de cette version de l'*edge bundling* est de n'être que graphique. Elle ne mobilise pas à proprement parler les données numériques, ni la matrice d'information géographique associée. Elle ne tient pas compte

de l'espace des positions, de l'existence d'une métrique qui contraint nécessairement la localisation des nœuds mais également les caractéristiques des liens, à savoir leur longueur.

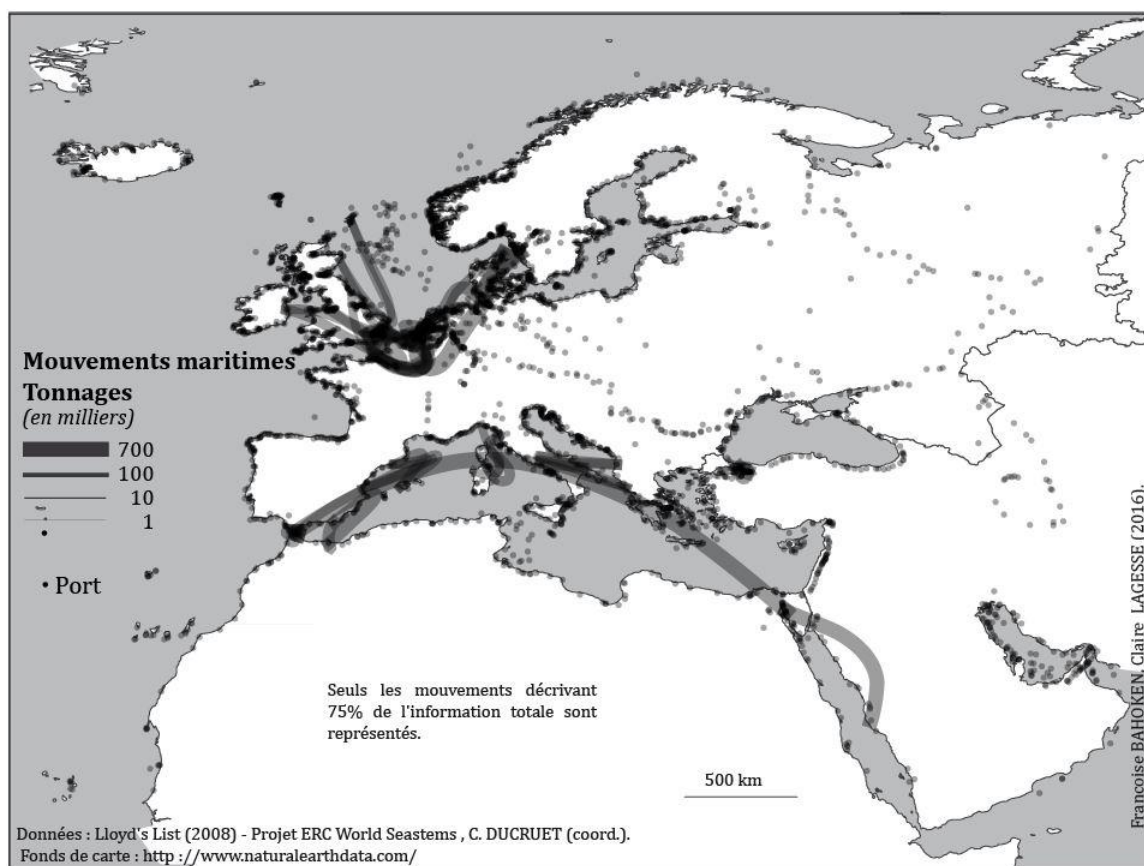
NOTE. — Appliquer une méthode graphique de fusion pour cartographier des flux, sans tenir compte de la thématique et de la topographie, peut conduire à des cartes impossibles. Celle de la Fig. 2 pouvant servir de modèle, on observe qu'elle représente efficacement et esthétiquement le mouvement de navires franchissant allègrement à la fois des mers et des terres (!).

Pour qu'elle soit réellement cartographique, et donc dotée d'une signification thématique dans le cadre d'analyse des flux ou des mouvements maritimes spatialisés, cette approche graphique nécessite de prendre en compte le fond de carte, c'est-à-dire le maillage caractérisant l'espace, voire le territoire, d'expression de ces flux. L'une des raisons majeures tient à un *effet de bords* inverse qui conduit à la manifestation d'*effets d'alignements* et d'*itinéraires* également présents dans la cartographie des flux et mouvements mondiaux (Bahoken, 2016 : 261-263).

Cet *effet de bords* est lié au fait que les ports sont situés en bordure d'une surface fermée mais non nécessairement continue que franchissent des navires. Les positions des ports délimitant la zone d'étude sont d'autant plus importantes qu'elles ne définissent pas son centre, mais ses marges, à la différence des analyses portant sur des lieux. Lorsque l'espace est pseudo fermé, comme dans le cas de la méditerranée, il devient impératif de tenir compte des marges.

Pour alléger la représentation des flux, il est possible de n'en sélectionner qu'une partie. La Fig. 4 représente les valeurs de flux supérieures au troisième quartile ($F_{ij} > Q_3 = 308,13$), soit les figurés qui décrivent 75% de l'information totale. Effectivement, en ne sélectionnant que les plus importants, la méthode permet de représenter les deux principaux sous-bassins caractéristiques de ces flux maritimes euro-méditerranéens : ceux qui concernent la Manche et ceux qui franchissent de part et d'autre la méditerranée.

Figure 4. Mouvements maritimes commerciaux (version 2)



Une seconde possibilité consiste à forcer l'algorithme à ne représenter que les liens sur les portions utiles de la zone d'étude (les espaces maritimes ou en eau), en identifiant des espaces de circulation impossible. Pour y parvenir, il est nécessaire d'insérer les continents pour délimiter la zone d'étude. Cela passe par la mise en œuvre d'une approche spécifiquement cartographique.

4.2. L'approche carto-graphique de représentation du mouvement

L'approche carto-graphique consiste à agir sur la position des lieux et, par conséquent sur le fond de carte, en lien avec la thématique des données. Sur le plan théorique, cela revient à considérer indirectement le mode de transport, voire l'infrastructure, ou le coût généralisé de déplacement. Sur le plan cartographique, la zone d'expression (de représentation) des flux sera ainsi réduite aux portions terrestres pour les modes ferroviaires ou routiers, ou aux portions maritimes ou fluviales.

Il existe des flux marchands variés soumis à différents types de contraintes de déplacement. Lorsque les flux maritimes sont limités à l'espace navigable, les flux routiers sont restreints à l'espace terrestre. Quant à eux, les flux aériens sont émancipés de ces contraintes physiques (ce qui ne signifie pas l'absence de voies aériennes). Tous sont cependant soumis, dans leur représentation, à un effet lié au choix du système de projection.

Dans le cas des flux maritimes, l'effet de proximité entre les ports induit une contrainte forte. Il n'est pas possible de transformer l'implantation des lieux, autrement dit d'assimiler les points d'OD à des zones qui en seraient représentatives (de la même manière que les barycentres correspondent aux centres de mailles politico-administratives, ...) puisque l'espace maritime de circulation des navires leur est exclu (les ports ne flottent pas). Les flux maritimes s'expriment en effet sur un espace par essence continu (les mers et océans), non discrétisé *a priori*, il ne peut l'être facilement *a posteriori*. Cette contrainte revêt d'autres avantages : l'intérêt de n'être pas assujéti à un maillage prédéfini, ce qui soulève la possibilité de mobiliser un maillage théorique pour partitionner l'espace.

4.3.1. Les possibilités de partitionnement des mers et des océans

Pour agir sur le fond de carte, c'est-à-dire sur les mers et les océans, il convient de modifier la surface qu'ils représentent de manière à ce que l'espace des positions (x,y) des ports, situés sur ses bords soit affecté.

En règle générale, cette méthode passe par un changement de système de projection cartographique ou par la mise en œuvre de déformations morphologiques ou de modifications des positions des lieux (CARTOD).

En faisant le choix de conserver la géographie des ports, il est nécessaire de changer de paradigme, en discrétisant l'espace maritime auparavant continu. Nous réalisons pour cela une partition de l'espace maritime qui servira de maillage pour la reconstitution d'itinéraires, des principaux points des passages devant permettre d'incurver le trait figurant le mouvement de navires.

Plusieurs possibilités sont envisageables :

- l'utilisation d'itinéraires empiriques (par exemple des « rails maritimes ») pour contraindre la circulation des navires dans des couloirs bien délimités. C'est l'une des approches mises en œuvre par D. Le Guyader et al. (2011) pour identifier les principales « zones de navigation » des navires de charge dans la rade de Brest.
- l'utilisation de découpages existants, de zones de circulation réglementée, pour segmenter l'espace en mailles, généralement hétérogènes. Dans ce cas, l'objectif serait de relier les barycentres pour reconstituer l'itinéraire le plus court entre deux OD. Le site internet Marine Regions propose par exemple une liste intéressante de régions des mers/océans (<http://www.marineregions.org/sources.php>), de même que le découpage en eaux territoriales ou celui de la FAO¹. Olivier Joly (1999) par exemple avait utilisé le découpage du monde en zones REEDS pour son approche des réseaux maritimes via la théorie des graphes.
- L'utilisation de maillages théoriques, générant des partitions hétérogènes de l'espace maritime sur lesquels il est possible d'agir.

4.3.3. L'utilisation de maillages théoriques

Plutôt qu'utiliser un découpage existant, orienté selon la problématique sous-jacente à sa création, il est possible de recourir à des maillages théoriques.

Différents types de maillages en fonction de la forme : régulières ou irrégulières, carrées, rectangulaires, nids d'abeille, existent dans la littérature. D. Dorling (1991) a beaucoup discuté dans sa thèse des avantages comparés de différents maillages terrestres. Peu d'auteurs, à notre connaissance, semblent avoir segmenté l'espace maritime dans l'objectif de reconstituer des trajectoires.

La méthode développée par Lagesse et al. (2016) consiste à construire un maillage théorique de la surface continue des océans. À partir d'un tirage de points aléatoire sur les mers et océans, plus ou moins dense selon la distance à la côte, une triangulation de Delaunay est construite. Un graphe est ainsi généré dont les sommets constitués par le tirage de points

¹ Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture.

initial, et les arcs sont issus du calcul de triangulation. Le graphe est ensuite complété en s'assurant que les connections sont faites aux différents canaux ou détroits ainsi qu'aux limites de la zone d'étude.

Chaque port est ensuite associé à un nœud de ce graphe, selon sa position géographique. Les chemins les plus courts sur le graphe sont enfin calculés entre chaque couple de ports, en utilisant l'algorithme de Dijkstra (Dijkstra, E. W. 1959). Le graphe prédéfini permet d'agréger les trajectoires sur les routes maritimes ainsi construites. Elles se révèlent proches de celles empruntées par les navires aujourd'hui, selon les observations des données AIS. Pour aller au-delà de la vision selon les fréquences, il est possible de réaliser des densités de fréquences des mouvements maritimes, qui permettront de mettre en évidence les couloirs de densité de navires. La fig. 5.

Conclusion

A l'échelle mondiale, par exemple, *l'effet d'alignement (ou effet de position) des lieux*, empêchant la perception claire des motifs des flux à cette échelle, est notamment résolu par le choix d'un système de projection approprié, dès les années 1920. Il l'était déjà par l'adoption du procédé distributif de Minard, *l'effet d'itinéraire*, lié à l'alternance terres-mers entre les couples de lieux.

Ces choix sont également essentiels du point de vue thématique. Il est important de souligner que le projet World Seastems est né en grande partie du constat selon lequel aucune cartographie de l'évolution des grandes routes maritimes mondiale n'existe à ce jour, malgré le fait que le transport maritime concentre non moins de 90% du volume des échanges mondiaux. Si la mise à disposition et la cartographie des données numériques maritimes a explosé depuis les années 2000, les données plus anciennes, comme celles de la Lloyd's, sont majoritairement des matrices OD, posant ainsi la question des visualisations les plus à même de retracer de la façon la plus pédagogique possible l'évolution du commerce maritime mondial au cours des siècles passés.

Figure 5a. Cartographie des mouvements maritimes : fréquences de lignes

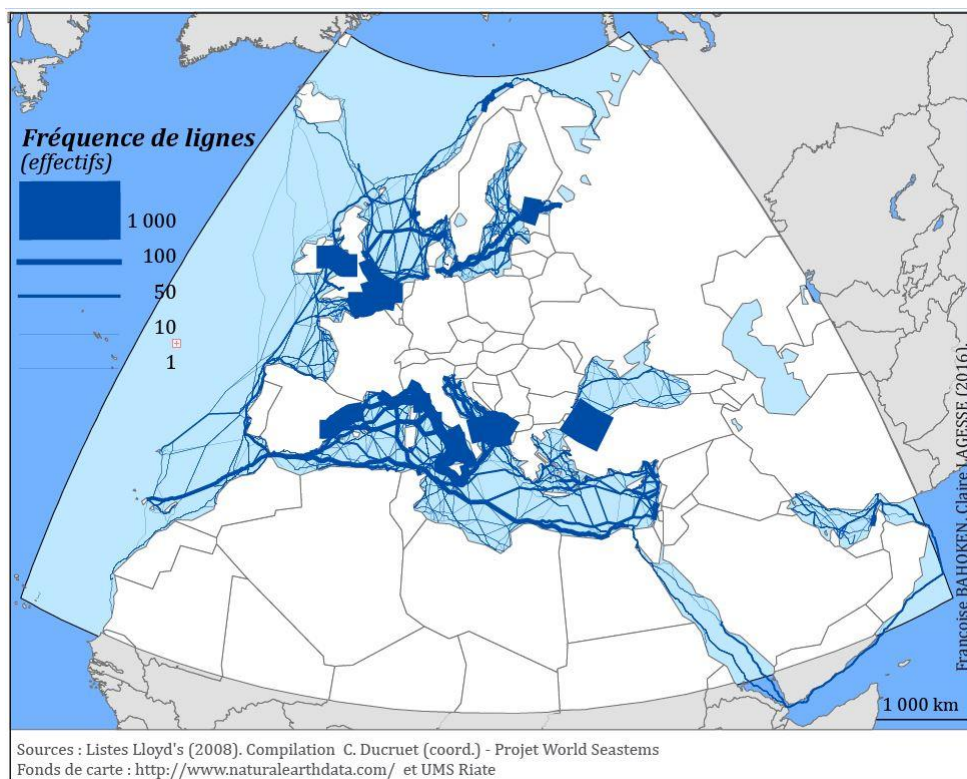


Figure 5b. Cartographie des mouvements maritimes, en tonnages

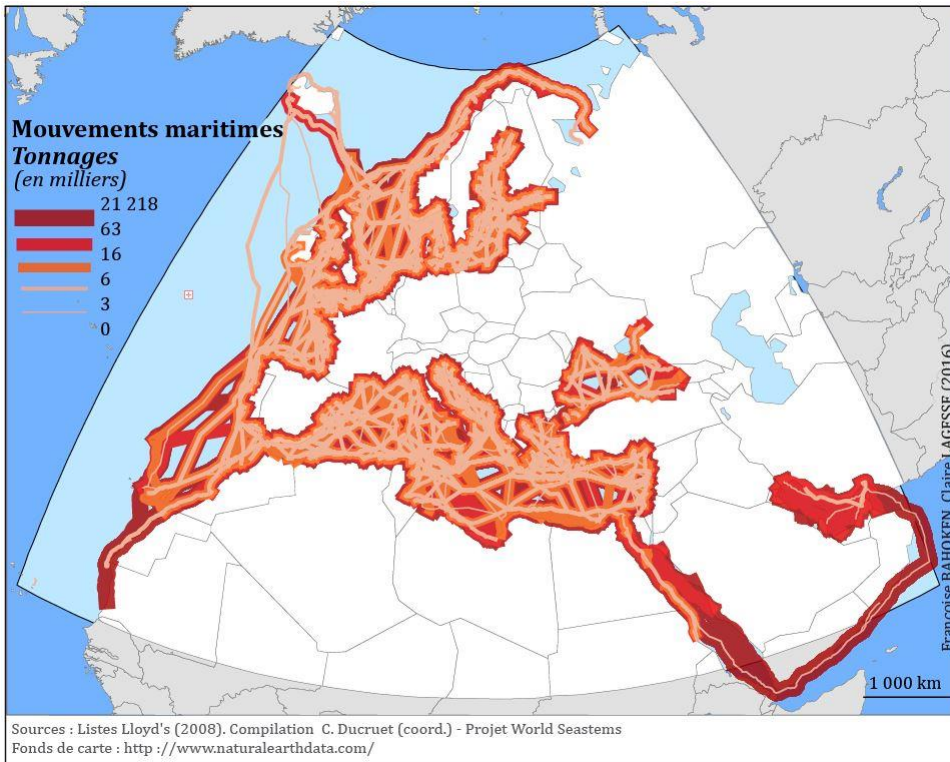
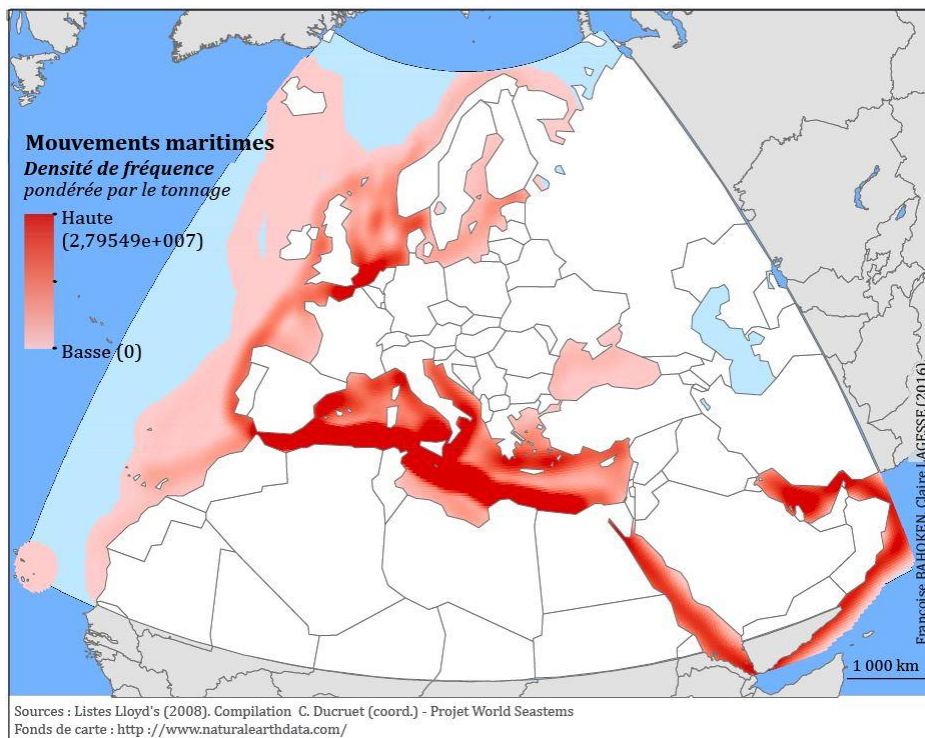


Figure 5c. Cartographie des mouvements maritimes : densité de fréquence pondérée par le tonnage



6. Bibliographie

- Bahoken, F. (2016), Contribution à la cartographie d'une matrice de flux, <https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-01273776>
- Bahoken, F. (2016a), L'approche cartographique de la décomposition des matrices de flux, *M@ppemonde*, n°116. URL : <http://mappemonde.mgm.fr/num44/articles/art14404.html>
- Bertin, J. (1973), *Sémiologie graphique. Les diagrammes – Les réseaux Les cartes*, pp. 344-345.
- Bretagnolle, A. (2005) De la théorie à la carte: histoire des représentations géographiques de l'espace-temps, in : Volvey A. (dir.), *Echelles et temporalités*, Atlante, Clefs Concours : Géographie thématique, pp.55-60. URL : https://halshs.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/156769/filename/Theorie_a_carteHAL.pdf
- Buard, E., Devogele, T., Ducruet, C. (2015) Trajectoires des objets mobiles dans un espace support fixe. *Revue Internationale de Géomatique*, 25(3): 331-354.
- Dijkstra, E. W. (1959). "A note on two problems in connexion with graphs" (PDF). *Numerische Mathematik* 1: 269–271. doi:10.1007/BF01386390.
- Ducruet, C. (2013), Histoire maritime et cartes en ligne, *M@ppemonde*, n°109, Rubrique Internet. URL : <http://mappemonde.mgm.fr/num37/internet/int13101.html>
- Ducruet, C. (dir.) (2015), *Maritime networks. Spatial Structures and Time Dynamics*. Routledge Studies in Transport Analysis.
- Garcia-Herrera, R., Können, G., Wheeler, D., Prieto, M.R., Jones, P., Koek, F. (2005) A climatological database for the world's oceans 1750-1854. *Climatic Change*, 73: 1-12.
- Goodchild, M. al. (2007)
- Grataloup, C. (2011),
- Guyader (Le), D., Brosset, D., Gourlemon, F. (2011), Exploitation de données AIS pour la cartographie du transport maritime, *M@ppemonde*, n°104, 15 p. URL : <http://mappemonde.mgm.fr/num32/articles/art11405.pdf>
- Joly, O. (1999) *La structuration des réseaux de circulation maritime*. Thèse en Aménagement du Territoire, Le Havre: Université du Havre.
- Lagesse, C., Mermet, E., Petit, S., Ducruet, C. (2016), Geovisualisation of the worldwide maritime network over 30 years. Challenges and preliminary results, *Proceedings of the 2nd International workshop on Maritime Flows and Networks (WIMAKS'16)*, Session 1: Géovisualization of Maritime Networks, Paris 25-26 april 2016.
- McKenzie, F.D. (1975) *Maritime Dynamic Traffic Generator. Volume III: Density Data on World Maps*. Working Paper No. AD-A012 498, Transportation Systems Center, Cambridge, Massachusetts.
- Nelson, A. (2008) *Travel time to major cities: A global map of accessibility*. Global Environment Monitoring Unit, Joint Research Centre of the European Commission, Ispra, Italy.
- Siegfried, A. (1940) *Suez, Panama et les routes maritimes mondiales*. Paris: Armand Colin.
- Tournadre, J. (2014) Anthropogenic pressure on the open ocean: The growth of ship traffic revealed by altimeter data analysis. *Geophysical Research Letters*, 41(22): 7924-7932.
- Ullman, E.L. (1949) Mapping the world's ocean trade: A research proposal, *The Professional Geographer*, 1(2): 19-22.