

Trajectoires d'objets mobiles dans un espace support fixe

Elodie Buard, Thomas Devogele, César Ducruet

▶ **To cite this version:**

Elodie Buard, Thomas Devogele, César Ducruet. Trajectoires d'objets mobiles dans un espace support fixe. Revue Internationale de Géomatique, 2015, MODÉLISER LES DYNAMIQUES SPATIALES, 25 (3), pp.331-354. hal-01171521

HAL Id: hal-01171521
https://hal.science/hal-01171521

Submitted on 12 Mar 2018

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.

Trajectoires d'objets mobiles dans un espace support fixe

Elodie Buard[1], **Thomas Devogele**[2], **César Ducruet**[3]

1. IGN, COGIT, 73 avenue de Paris, 94160 Saint Mandé, France
UMR 8504 Géographie-Cités, Universités Paris Est et Paris 1
13 rue du Four
75006 Paris, France

2. Université François Rabelais Tours, Laboratoire d'Informatique
3 place Jean Jaurès
41000 Blois, France
thomas.devogele@univ-tours.fr

3. CNRS & UMR 8504 Géographie-Cités
13 rue du Four
75006 Paris, France
cdu@parisgeo.cnrs.fr

Publié dans Revue Internationale de Géomatique (2015), Vol. 25, No. 3, pp. 331-354

RÉSUMÉ. *Les objets mobiles se déplacent dans une portion d'espace. Leurs positions sont mesurées par différents moyens : des capteurs externes à l'objet ou portés par celui-ci. Nous exposons les méthodes de construction et d'analyses de trajectoires d'objets mobiles. Nous nous appuyons pour cela sur deux cas d'étude : les déplacements de navires en mer et ceux d'herbivores.*

ABSTRACT. *Mobile objects are moving in a portion of space. Their positions are measured in different ways: devices located on fixed locations or held by the object. We expose methods to construct and analyze trajectories of mobile objects. For that, we are using two study cases: ship and herbivore movements.*

MOTS-CLÉS : *objets mobiles, trajectoires, POI, cluster.*

KEYWORDS: *mobile objects, trajectories, POI, cluster.*

1. Introduction

1.1. Contexte et définitions

Les premiers travaux qui ont décrit les déplacements individuels sont ceux de la *Time Geography* (Hägerstrand, 1970). Celle-ci propose un cadre conceptuel pour analyser les déplacements des individus dans leurs activités et selon des contraintes d'accès aux lieux d'activités. Auparavant, Charles Joseph Minard avait, dès 1869, décrit de manière spatiale et temporelle les déplacements de l'armée napoléonienne lors de la campagne de Russie. Dans ces travaux, les déplacements étaient appréhendés uniquement par des changements de lieux, fréquentés successivement pour accomplir certaines activités. Le but de ces travaux était de mettre en évidence les effets de ces déplacements, surtout d'un point de vue macroscopique (congestion, politique de transports, aménagement, stratégie).

Des avancées comme la multiplication et la miniaturisation des capteurs de position ou encore l'augmentation des capacités de traitement ont permis depuis quelques années de renouveler les approches et de proposer des analyses plus fines. Ainsi un grand nombre de questions de recherche, dans différents domaines des sciences humaines, des transports ou de l'écologie, sont aujourd'hui abordées par l'étude de déplacements d'objets en mouvement, autrement dit « mobiles ». L'objet mobile peut alors représenter un individu humain (Knorr *et al*., 2000 ; Viana *et al.,* 2011), un moyen de transport (Wan *et al*., 2007 ; Kharrat *et al*., 2008), un phénomène naturel comme un cyclone (Lee *et al*., 2008 ; Moisuc *et al.,* 2005) ou encore une maladie (Eliot et Daudet, 2006). De multiples approches sont utilisées, comme la simulation des déplacements de piétons à base d'agents (Banos et Lassarre, 2008), l'analyse spatiale des risques liés aux traversées piétonnes (Bonnet et Lassarre, 2008) ou encore l'analyse de l'ensemble des déplacements des ménages d'une ville, rendant compte des activités urbaines, appelées « pulsations urbaines ». Ce travail peut être appréhendé à partir des données de téléphonie mobile (Elissalde *et al*., 2011) ou des enquêtes ménages déplacements (Hurez et Baroudi, 2010) pour ne citer que quelques exemples. Des travaux récents font également le point sur les problèmes de définition et de représentation des processus spatiotemporels en géographie (Cheylan, 2007)[1] pour aborder les nouvelles façons de visualiser ces données.

Dans ce chapitre, le sujet central est l'objet mobile. Nous le définissons comme un objet géographique qui change de localisation au cours du temps, tout en conservant la même identité (Pfoser et Theodoris, 2003 ; Laube *et al.,* 2004). Dans ce contexte, l'étude des évolutions d'un objet mobile se focalise sur ses changements géométriques, et plus précisément sur l'ensemble des positions spatiales qu'il occupe (Lenntorp, 1976). Cette définition fait écho aux mouvements étudiés en physique : il s'agit de la variation d'un point d'un objet, étudié dans un référentiel donné, en fonction du temps.

---

1. Voir notamment les travaux du groupe GCART : http://www.umrespace.org/ActGCart.htm

Quelle que soit la taille réelle de l'objet, nous considérons ici que sa géométrie est réduite à un point. Étant donné le grand nombre de définitions existant sur les déplacements et les trajectoires, il nous paraît important de les fixer ici.

En mathématiques et en physique, la trajectoire d'un objet est la courbe décrite par n'importe quel point appartenant à cet objet. Dans le langage courant, on parle aussi de déplacements. D'un point de vue formel, dans cet article, une trajectoire est définie comme une suite ordonnée de positions d'un point de l'objet dans un référentiel sur une période de temps (Spaccapietra *et al.*, 2008). De plus, chacune de ces positions est estampillée par une valeur temporelle, représentant un instant associé à un système temporel de référence, un calendrier par exemple. Les trajectoires peuvent ainsi être décrites soit par des calculs, comme ses caractéristiques de vitesse, d'accélération ou de distance parcourue (Dykes et Mountain, 2003), à la manière de ce qui est fait en physique, soit par la représentation graphique des positions successives prises lors des déplacements (quelques exemples en figure 1).

En pratique, une trajectoire est toujours estimée et interpolée, puisque l'objet mobile n'est jamais suivi en continu. Cependant, la précision spatiale et temporelle des trajectoires d'objets mobiles estimées dépend des sources de données. Les observations peuvent varier entre des positions très précises qui se déroulent de façon quasi continue dans le temps (par exemple des positions enregistrées toutes les centièmes de secondes) et une suite d'origines-destinations atteintes à certains instants. Dans ce dernier cas, comme les observations sont moins précises, la trajectoire l'est également. Cependant, il faut nuancer ces propos relativement à la vitesse de l'objet mobile observé. S'il s'agit d'un objet qui relie des origines-destinations rapidement (comme navire ou une voiture par exemple), ces observations sont plus précises que pour un objet se déplaçant lentement. Autrement dit, l'incertitude spatiale et temporelle, c'est-à-dire le fait de ne pas savoir où se trouve l'objet mobile, dure peu de temps pour un objet mobile rapide.

Certaines positions particulièrement pertinentes pour la thématique étudiée sont mises en évidence ; elles sont appelées POI (*Points of Interest).* Ces POI sont par exemple des lieux de travail pour des piétons ou un point d'eau pour des animaux. Dans le cas des navires, l'origine et la destination des navires sont aussi des POI. Plusieurs trajectoires issues d'un ou plusieurs objets mobiles peuvent passer par un même POI ; seule la dimension spatiale de la trajectoire est étudiée pour identifier un POI. Ce processus d'identification des POI est complexe : il nécessite l'intégration de connaissances géographiques externes. L'extraction de cette connaissance peut être réalisée à partir d'une description de l'espace avec les experts du domaine étudié ou d'analyses des densités de présence et des points arrêts des objets mobiles.

Ces POI permettent de définir un concept : l'itinéraire. Il s'agit du chemin reliant deux POI, sans considérer la dimension temporelle. Il peut donc être emprunté par un ou plusieurs objets mobiles.

Les thématiques relatives aux objets mobiles et à leurs déplacements ont des besoins méthodologiques et conceptuels. Les verrous conceptuels concernent l'élaboration d'un modèle conceptuel approprié ; les verrous méthodologiques englobent la visualisation et la gestion de l'incertitude des localisations des objets mobiles (Etienne, 2011), l'analyse des caractéristiques des déplacements ou l'identification de lieux fréquentés par les objets mobiles (Buard, 2013).

1.2. Objectif

Face à cette diversité, cet article propose de synthétiser les méthodes d'analyse communes pour traiter des déplacements d'objets mobiles, à travers deux cas d'études illustratifs :

– le déplacement de navires dans l'espace maritime. Il s'agit ici d'une part d'identifier des types de déplacements selon les types de navires et d'autre part de mieux comprendre comment se construisent les routes maritimes d'une part et la hiérarchie portuaire d'autre part. La granularité temporelle et spatiale de suivi des navires varie grandement, de celle du GPS (1 seconde et 10 m de précision) à celle des grandes routes maritimes agrégeant plusieurs navires et ports sur une temporalité annuelle ;

– le déplacement de grands herbivores, buffles, éléphants et zèbres, dans un parc naturel au Zimbabwe. Ici, il s'agit d'identifier les relations entre les pratiques de déplacement des herbivores et l'évolution de la végétation. Différentes temporalités sont étudiées : de la journée à une dizaine d'années.

Il apparaît nettement que ces deux applications sont très différentes (objets mobiles, granularité, objectifs, etc.). Néanmoins des méthodologies globales se dégagent : il s'avère que des outils communs de prétraitement des trajectoires et d'enrichissement des connaissances sont employés. Le cas échéant, le passage en revue des méthodes proposées dans cet article fait appel à des terrains complémentaires afin d'étayer les propos. Il s'agit donc d'établir un cadre méthodologique commun aux études de déplacements.

Dans la section 2, nous décrivons les choix spatiaux et temporels pour mettre en place les modèles décrivant des déplacements d'objets mobiles. Puis, la section 3 expose les traitements à effectuer pour analyser les données brutes (les positions), construire une trajectoire et extraire les POI. Enfin, la section 4 présente les principales méthodes pour analyser les trajectoires pour en extraire des connaissances.

2. Contraintes spatiales et temporelles prises en compte dans les modèles décrivant les déplacements d'objets mobiles

La représentation du temps et de l'espace dans les études de déplacements d'objets mobiles n'est pas neutre dans la modélisation et l'analyse des déplacements. Comme ces choix favorisent certaines comparaisons et expliquent les analyses effectuées par la suite, nous tenons à en discuter dans ce paragraphe.

2.1. Caractéristiques de l'espace support

2.1.1. Contraintes spatiales

Le contexte (ici l'espace) impose certaines contraintes de déplacements ou d'arrêts pour des objets mobiles : traits de côtes, POI stratégiques ou climat. Cependant ils conservent une certaine flexibilité dans leurs déplacements, qui correspond à un degré de liberté spatial. Ce degré de liberté dépend du contexte et de l'objet mobile considérés.

En effet, les véhicules qui empruntent nécessairement les routes existantes peuvent néanmoins choisir divers enchaînements temporels pour parvenir à destination.

Les navires naviguent dans la mer et plus précisément dans des chenaux maritimes mais ces derniers sont suffisamment vastes, ce qui laisse un choix spatial au navire. Par ailleurs,

les navires ont l'obligation de rejoindre des ports, dont la répartition répond également à certains critères physiques (accessibilité nautique), d'où un nombre restreint de choix possibles (Rodrigue *et al.*, 2009).

Les animaux, eux, sont peu contraints par l'espace parcouru comme il n'y a aucun réseau de déplacement *a priori*. Cependant, leur degré de liberté est délimité par leurs capacités de déplacements et leurs besoins qui nécessitent de s'arrêter à des zones de ressources (points d'eau ou zones de végétation).

2.1.2. Hypothèse de stabilité de l'espace

Les études décrivant les déplacements d'objets mobiles font souvent abstraction de l'évolution de l'espace. Il est alors considéré comme un espace support, sur lequel vivent les populations humaines et animales, et stable dans le temps. Cependant, cette hypothèse est discutable. En effet, lors des déplacements, ses propriétés peuvent être modifiées par l'apparition d'entités au cours du temps, selon certaines temporalités, ou la modification de leurs caractéristiques. À titre d'exemples, dans le premier cas, de nouveaux ports ou de nouveaux points d'eau peuvent apparaître ou disparaître (par exemple, de nouveaux terminaux à conteneurs hors des villes portuaires « traditionnelles » ont été créés, comme Gioia Tauro, port de transbordement en Calabre, ou Yangshan nouveau port de Shanghai) ou la marée basse peut faire apparaître des rochers, créant de nouvelles contraintes de déplacement pour les navires. Dans le second cas, certaines zones d'occupation du sol peuvent changer de composition floristique. L'échelle (ou le niveau) géographique d'observation est alors prépondérante pour la modélisation de cette évolution puisqu'une nouvelle entité à un niveau très fin pourra être interprétée comme l'expansion d'une entité déjà existante à un niveau plus agrégé, comme le nouveau port de Shanghai, distant de 30 kilomètres du port ancien mais servant la même métropole.

Ces modifications de l'espace sont à prendre en compte pour l'étude des déplacements d'objets mobiles si la période de temps considérée est grande (par exemple une cinquantaine d'années, ce qui est le cas pour les études de cargos) ou si ces modifications influencent les déplacements. On étudie alors d'une part les objets mobiles dans leur référentiel spatial et d'autre part les modifications de l'espace.

Les deux évolutions (celle de l'espace et celle des objets mobiles) peuvent être synchrones ou asynchrones et suivre différentes temporalités. Prenons le cas d'herbivores. Ils se déplacent en fonction des ressources présentes dans un espace naturel pour se nourrir. Un déplacement d'herbivores peut être dû à la disparition d'une ressource : les évolutions sont alors synchrones. Dans ce cas précis, notons que l'évolution de l'espace peut être due aux actions répétées des herbivores, créant localement un surpâturage. Les deux évolutions s'influencent donc mutuellement par une boucle de rétroaction : l'espace est support de déplacement d'herbivores et modifié par ces derniers (Buard et Brasebin, 2011).

2.2. Temporalités en jeu

Le mouvement, l'espace et le temps sont intimement liés. La mesure du temps de référence, la seconde, est elle-même définie en fonction des oscillations (mouvement) d'un atome de césium-133. Un déplacement est défini comme un mouvement significatif qui a une durée représentée par un intervalle de temps entre deux POI : le départ et l'arrivée. Les POI sont mesurés de façon instantanée d'un point de vue temporel ; on les représente toujours comme des instants.

De là, deux choix de modélisation du temps s'opposent pour étudier les déplacements : la représentation linéaire (décrit plus en détails en 2.2.1) et la représentation cyclique (en 2.2.2).

2.2.1. Représentation linéaire

Le modèle le plus courant est celui d'un temps linéaire où une suite d'évènements sont

ordonnés chronologiquement et datés dans un calendrier. Cette représentation est celle des frises chronologiques et est employée entre autres dans l'étude des activités humaines de la *Time Geography* (Hägerstrand, 1970). Par ailleurs, elle est très utile pour étudier l'enchaînement d'évènements ponctuels. Par exemple, l'étude des déménagements de foyers suite à des évènements (naissance, mutation, divorce…) utilise cette représentation.

Le calendrier qui date les évènements peut être remplacé par une datation relative à un évènement spécifique au déplacement. Ce passage à une datation relative est fondamental pour analyser des déplacements qui se répètent régulièrement dans le temps. Ainsi une trajectoire qui a eu lieu le 10 décembre peut être plus facilement comparée à un déplacement similaire du 20 janvier. Les estampilles temporelles des deux déplacements sont alors complétées par des estampilles relatives (temps écoulé depuis le départ). A la représentation absolue du temps est alors substituée une représentation relative. Une datation relative en pourcentage de la durée de la trajectoire peut aussi être employée en fonction du moment d'arrivée.

Pour illustrer ces différentes représentations du temps, supposons une position à l'instant 12h30m15s le 6/6/2012 (temps absolu) pour un déplacement qui a commencé le même jour à 12h25m18s et s'est terminé à 12h41m13s, cette position en temps relatif a pour estampille temporelle 297 secondes en temps relatif soit
31,10 % exprimé en pourcentages. Néanmoins, ces représentations relatives peuvent se révéler inadaptées pour l'étude de nombreux déplacements qui se répètent régulièrement. Dans ce cas, la représentation cyclique du temps leur est préférée.

2.2.2. Représentation cyclique

Dans certains types de déplacements, une représentation cyclique du temps est plus adéquate. Des cycles naturels et les cycles calendaires peuvent être distingués.

Les phénomènes astronomiques entraînent plusieurs cycles naturels qui règlent un grand nombre de déplacements. Parmi ces cycles qui se superposent, on peut citer par exemple :

– La succession des saisons,

– L'alternance jour/nuit,

– Les marées.

Ces cycles influencent des déplacements tels que respectivement les migrations d'animaux, nos activités diurnes et nocturnes ou les déplacements des navires. à ces cycles s'ajoutent ceux propres aux activités anthropiques et qui suivent des temporalités variées :

– Les jours travaillés et les jours chômés,

– Les périodes de vacances, de festivités ou de soldes,

– Les week-ends suivant les payes mensuelles,

– Les horaires des transports en commun.

Ces cycles entraînent des variations importantes de nos déplacements et des phénomènes qui en découlent tels les congestions de trafic routier ou le trafic de marchandises. On peut également mentionner les grands cycles économiques ainsi que les cycles propres au domaine étudié, comme l'offre de transport des lignes maritimes conteneurisées (lignes dites régulières) ou les lignes de métro, bus, les lignes aériennes. Par exemple, le transport maritime conteneurisé connaît chaque année un pic saisonnier vers le mois d'octobre en réponse aux exportations massives de produits de consommation depuis l'Asie vers l'Europe et l'Amérique du Nord pour préparer les fêtes de fin d'année.

2.2.3. Points de rupture

Ces phénomènes cycliques peuvent être marqués par des points temporels de rupture qui se caractérisent par une modification importante en forme et en rythme d'un grand nombre de déplacements. Ce type d'évènements est de nature variable :

– Naturelle (catastrophe naturelle, changement climatique) ;

– Économique et politique (accord commercial ou rupture d'accord, guerre, choc pétrolier, lois d'abattage d'animaux, etc.) ;

– Logistique (congestion ou mise en service d'un nœud ou d'une route, modification d'une ligne de transport en commun, percement ou fermeture d'un canal transocéanique).

Ces points de rupture peuvent faire partie du modèle de déplacements d'objets mobiles ou faire l'objet d'analyses afin de détecter les dates de rupture ou les périodes de transition et de les qualifier par la suite. On peut aussi avoir recours à la simulation pour modéliser l'impact d'un point de rupture ainsi que la capacité des flux à revenir à une situation proche de la précédente.

3. Construction ou traitements nécessaires pour obtenir des trajectoires d'objets mobiles

3.1. Les méthodes d'acquisition employées pour produire des données brutes

Comme les objets mobiles ne peuvent pas être suivis de manière continue au long de leur déplacement, l'analyse de leurs trajectoires est souvent limitée. Concrètement, les données brutes peuvent être de plusieurs types et faire appel à différentes technologies.

D'abord, des bases de données existantes décrivent les localisations de certains objets mobiles. Elles ont l'avantage de recenser les déplacements sur une longue période. Des enquêtes origine-destination, recensant les habitudes de déplacements des individus, sont aussi employées. Pour les navires, différentes bases de données historiques existent et fournissent des suites d'escales ordonnées : les publications de l'assureur *Lloyd's* qui recense depuis le 18^{e} siècle les escales successives des navires de commerce dans le monde, les données sur l'offre de service des armateurs (comme *Containerisation International*), ou encore les registres de navigation appelés *ship logs* (voir figure 1) (Ducruet, 2013a).

Puis, un grand nombre de capteurs différents peuvent être mis en place. On distingue ici deux types de capteurs.

Les premiers sont fixes et localisés sur des lieux précis. Ils servent à compter le nombre de passages de plusieurs objets mobiles. On obtient ainsi un nombre d'individus par capteur, décomposé selon des durées de référence (par jour, par mois). Par exemple, pour identifier les flux de trafic routier, on utilise des boucles de comptage. Depuis une dizaine d'années, les ports fréquentés par les navires de commerce sont recensés, grâce à des réseaux tels SafeSeaNet à l'échelle européenne ou Trafic 2000 pour la France. Les animaux peuvent également être recensés s'ils passent à une distance visible de points d'observation, ce qui est appelé « comptages visuels », effectués deux fois par an (Buard, 2013).

Les seconds types de capteurs sont centrés sur les objets en déplacement : capteur vidéo, radar, système RFID (*Radio Frequence Identification*) ou système AIS (*Automatic Identification System*) qui rend compte des positions intermédiaires des navires en haute mer ou le long des côtes en raison de la portée limitée des transpondeurs AIS et des radars côtiers (environ 30 km) (Le Guyader *et al.*, 2012). Le système de positionnement GPS (*Global Positioning System*) joue ici un rôle fondamental : les capteurs GPS peuvent être directement installés sur les objets mobiles et enregistrer leurs positions, quelle que soit la localisation de l'objet. Ces positions GPS sont plus précises spatialement et temporellement que celles issues des bases de données historiques. Notons que cette technologie est contrainte par le mode d'émission des informations et la capacité de la batterie, pour des GPS autonomes (ceux positionnés sur des animaux par exemple). Ces contraintes entraînent des suivis des déplacements sur de courtes périodes de temps (une année au maximum).

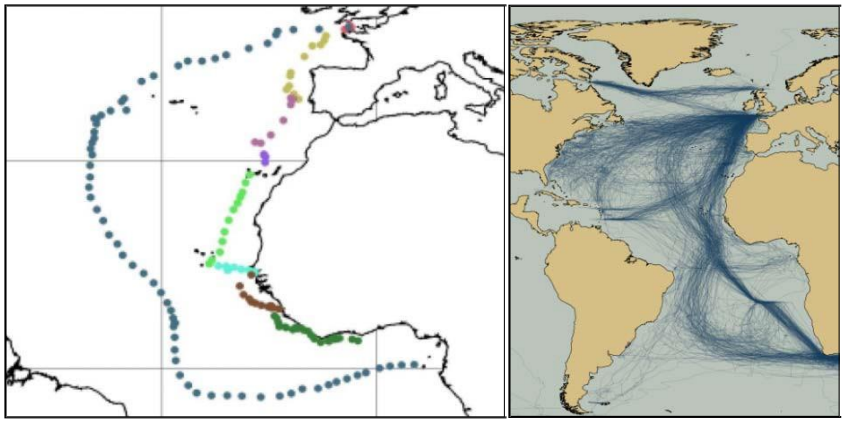


Figure 1. Positions successives du navire Surprise (1750-1751) lors d'un voyage aller-retour Europe-Afrique de l'Ouest (gauche) et aperçu de la superposition des trajets de la flotte britannique entre 1750 et 1800 (droite)
(sources : CLIWOC Final Report et Spatial Analysis)

Comme les capteurs GPS sont très utilisés dans les études de déplacements d'objets mobiles, nous décrivons ici la nature de ces données. Les capteurs GPS enregistrent une succession de positions GPS ayant trois composantes : latitude, longitude et estampille temporelle. L'estampille temporelle permet d'ordonner temporellement les positions et donc de retrouver la direction du déplacement. Par ailleurs, les enregistrements sont séparés par un intervalle de temps, le plus souvent fixe, qui correspond à une fréquence d'acquisition. Cette fréquence dépend de l'objectif de l'étude (logistique, sécurité, analyse de comportements), de l'objet mobile étudié (vitesse, capacité de déplacement) et des capacités de stockage du GPS. A titre d'exemple, pour les animaux, qui portent les GPS sur des colliers, cet intervalle est d'une heure pour les buffles et les zèbres et d'un jour pour les éléphants. Pour les navires, le système AIS renvoie les positions des navires à intervalles variables, variant entre 6 et 20 secondes selon la cinétique du navire.

3.2. Une construction : des positions à une trajectoire

Pour représenter une trajectoire, les positions successives d'un même objet sont reliées. Cette construction est faite par interpolation linéaire entre les positions. Or c'est une construction incertaine parce que nous ne connaissons ni la localisation exacte de l'objet ni sa vitesse entre deux positions. C'est une estimation qui résulte de l'hypothèse, souvent utilisée pour construire des trajectoires, que le chemin entre deux positions successives est relativement droit et direct. La deuxième hypothèse est que le déplacement est orienté en partant de la position p et en allant vers la position p+1, suivant ainsi l'ordre temporel des positions et l'orientation de la trace réelle. Enfin, entre ces positions, nous considérons donc que la vitesse est constante entre les points et est calculée par le rapport entre la distance entre les points et la fréquence d'acquisition. D'après ces hypothèses, la trajectoire est l'ensemble des segments correspondant à l'interpolation linéaire entre les positions successives, comme illustrée en figure 2. Notons que plus les positions sont éloignées entre elles spatialement et temporellement, plus la trajectoire créée est imprécise : ce chemin direct et droit entre les positions est peu probable si les points sont très éloignés. Néanmoins, cette construction est importante parce qu'elle fournit des informations sur les passages probables des objets mobiles.

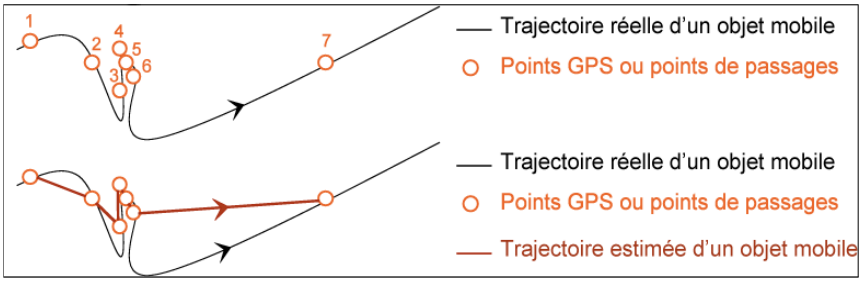


Figure 2. Différence entre trajectoire réelle et trajectoire estimée

3.3. Les traitements sur les localisations et points d'intérêt avant la construction de trajectoire

3.3.1. Filtrages spatiotemporels et sémantiques

Avant de créer la trajectoire, il faut effectuer un filtrage des positions pour ne garder que celles de bonne qualité. Le filtrage en informatique est une opération qui consiste à retirer les bruits dans les données pour ne garder que les informations pertinentes et de qualité. Ici, il s'agit donc de conserver les positions GPS ou les points d'intérêt qui ont du sens et suffisamment précis dans l'espace et dans le temps. Le filtrage intervient donc en amont de la construction de la trajectoire, avant son analyse, comme illustrée en figure 3, de façon à obtenir une trajectoire qui a du sens.

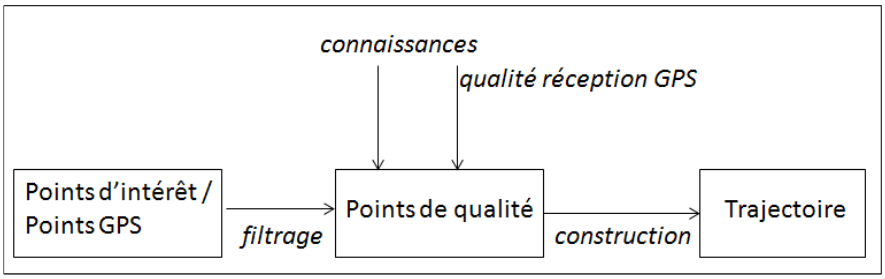


Figure 3. Étapes de filtrages des positions puis de construction de trajectoire

Plusieurs types de filtrages sont utilisés :

– Filtrages spatiotemporels : des positions mal reçues par le capteur GPS (conditions météorologiques, masque de végétation), identification de la période de validité du déplacement (mise en circulation du navire, du collier GPS ou sélection d'une période d'intérêt).

– Filtrages physiques : suppression des positions aberrantes relativement à des connaissances physiques qui concernent le modèle physique de déplacement de l'objet mobile (comme sa capacité de déplacement, son rayon de braquage ou son accélération) et les relations avec son espace support (par exemple, un piéton ne marche pas sur l'eau ou une voiture passe par des routes).

– Filtrages réglementaires liés à des connaissances réglementaires (par exemple : ce navire ne peut pas rester plus de cinq heures à quai dans ce port).

En figure 4 est présenté un filtrage physique. Les positions trop loin spatialement ne sont en effet pas intégrées dans la trajectoire, comme P9 sur la figure. Ils sont en effet atteints par une vitesse supérieure à la vitesse maximale attendue, déterminée par des connaissances physiques. De la même façon, celles qui sont trop loin temporellement ne sont également pas reliées aux précédentes dans une même trajectoire. Ainsi le lien entre P3 et P4 est peu vraisemblable.

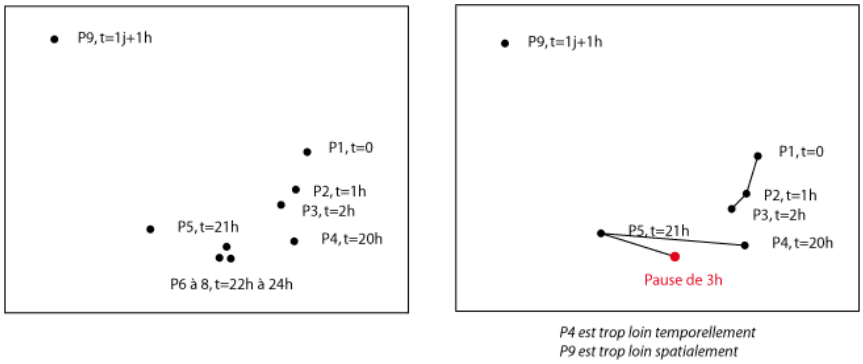


Figure 4. Exemple de filtrages physiques des positions numérotées de P1 à P9 : P4 et P9 ont été filtrés à cause de leur trop grande distance temporelle et spatiale des autres positions ; ils ne peuvent pas être atteints par l'objet mobile. Ils constituent deux trajectoires

Pour résumer, l'étape de filtrage nécessite des connaissances supplémentaires (physiques et réglementaires) pour construire une trajectoire de bonne qualité géométrique et sémantique. Cette étape requiert aussi des connaissances relatives au domaine thématique lié à l'étude de l'objet mobile. Jusqu'à présent, nous avons présenté des modèles génériques de trajectoires, fondés sur une construction géométrique d'une trajectoire à partir de positions enregistrées (plus ou moins précisément). Or ce processus de filtrage n'est pas générique, puisqu'il est lié à une thématique. C'est pourquoi nous appelons « modèle appliqué de trajectoire », le modèle de trajectoires qui s'appuie sur des connaissances thématiques et qui englobe l'étape de filtrage.

3.3.2. Simplifications de la trajectoire

Une fois ces filtres appliqués et la trajectoire construite, il est ensuite possible de simplifier la trajectoire, en ne conservant que les positions significatives qui correspondent le plus souvent à des changements de vitesse ou de directions lors du déplacement (Etienne, 2011). Pour cela, un algorithme spatiotemporel très utilisé est celui de Douglas et Peucker (Bertrant *et al.*, 2007 ; Meratnia, By (de), 2004) ; il compare les distances entre les positions enregistrées et leur projection sur une droite.

Le travail de Guo *et al.* (2010) simplifient la trajectoire de poids lourds à Athènes après un recalage des positions GPS enregistrées sur le réseau viaire, par des requêtes spatiales (voir figure 5). La trajectoire est segmentée ainsi en de multiples tronçons de base adjacents.

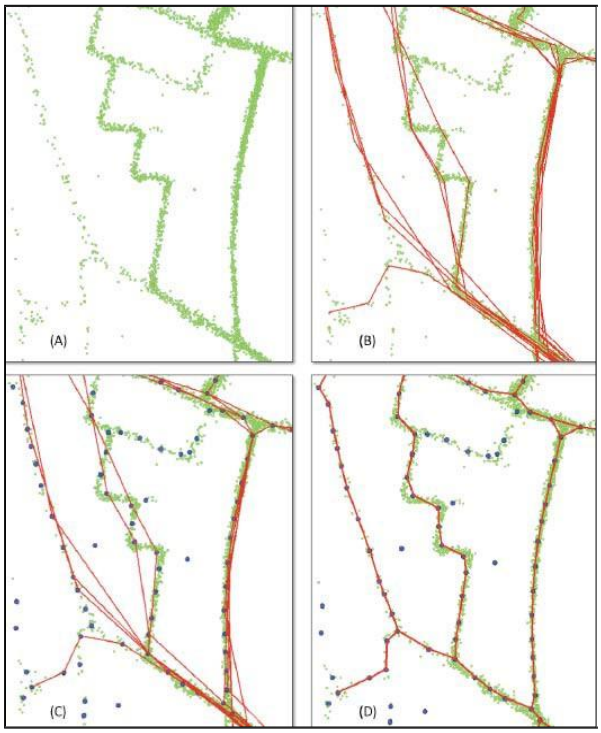


Figure 5. Méthode d'identification et de simplification des trajectoires à partir de signaux GPS émis par des poids lourds (Source: Guo et al.*, 2010)*
N.B. les 4 phases de (A) à (D) décrivent la simplification progressive des trajectoires grâce à des requêtes spatiales de type SIG, depuis le semis de points représentant chaque poids lourd à un moment donné en vert (A) jusqu'à la représentation des axes de transport les plus fréquentés en rouge (D)

4. Analyses des déplacements et des trajectoires des objets mobiles

Une fois les données brutes traitées et intégrées en base selon le modèle de trajectoire adéquat, les déplacements peuvent être analysés. Les objectifs des études de trajectoires sont divers. Le plus souvent, on cherche à extraire des connaissances pour répondre à des questions concernant les déplacements et de différentes natures, par exemple :

– Existe-il des sous-réseaux dans les déplacements des objets mobiles ?

– Ou : Quel est le comportement global des objets de tel type pour relier deux points d'intérêts ?

– Ou : Quand ce lieu est-il fréquenté dans la journée ?

Ces connaissances concernent alors différents types d'objets :

– les trajectoires en elles-mêmes (identifier des comportements types, décrire les flux),

– les POI,

– les périodes d'intérêt.

Les modèles descriptifs de trajectoires sont les plus utilisés dans les études d'objets mobiles. Dans ce cas, les déplacements sont décrits précisément, dans les comportements, les lieux qu'ils fréquentent et/ou les périodes de fréquentation. Ils servent aux experts du domaine (écologie, transport, urbanisme, trafic maritime) pour les aider à prendre leurs décisions. Par exemple, un modèle peut décrire comment les objets mobiles de tel type se déplacent pour aller d'un point A à un point B. Les décideurs peuvent utiliser ces modèles pour comparer les déplacements de deux types d'objets ou pour extraire des déplacements aberrants.

Dans ce type de modèle, existent pratiquement toujours quelques éléments explicatifs

des déplacements, de façon à mieux les comprendre : corrélations entre déplacements et espace support, explications de l'évolution de la fréquentation des ports principaux ou points de rupture dans une trajectoire. Cependant, le modèle a pour vocation d'être descriptif et non explicatif.

Pour réaliser ces diverses analyses, différents outils sont utilisés :

– l'analyse spatiale qui a pour objectif de mettre en évidence les formes d'organisation spatiale à partir des données spatiotemporelles ;

– les systèmes d'information géographiques (SIG) pour visualiser et analyser les données ;

– la fouille de données qui a pour vocation d'extraire des connaissances à partir de grandes quantités de données, par des méthodes automatiques. Cette extraction emploie un grand nombre d'outils venant de la statistique et de l'intelligence artificielle ;

– des outils issus d'autres disciplines comme les mathématiques (théorie des graphes pour mettre en évidence des propriétés d'un réseau, comme la centralité d'un point), la sociologie (par exemple *Social Network Analysis*) et la physique (réseaux invariants d'échelle ou *scale-free*).

Nous détaillons par la suite trois types d'analyses : la première tient compte des positions (et non des trajectoires) d'un objet mobile (voir 4.1), la seconde agrège plusieurs trajectoires (4.2) et la dernière cherche à prédire les déplacements (4.3).

4.1. La densité des déplacements et des trajectoires

Plusieurs approches sont envisageables pour analyser les densités des déplacements et des trajectoires. La première emploie les points d'intérêt (POI), tandis que la seconde se focalise sur certains critères attributaires des objets.

Une fois les POI définis dans l'espace d'étude, il est intéressant d'étudier comment les trajectoires les relient entre eux et le nombre de trajectoires les reliant. Pour chaque couple de POI, un nombre de trajectoires est ainsi obtenu. Des cartes de densité de présence de l'objet mobile peuvent ainsi être produites, en se focalisant soit sur les déplacements, soit sur les trajectoires. La figure 6 présente des exemples de cartes de densités de déplacements : la densité de présence d'un joueur de football sur le terrain (haut gauche), celle des déplacements de festivaliers en milieu urbain à Gand (bas), avec la largeur des arcs proportionnelle au nombre de piétons, la densité des flux de poids lourds à Athènes avec un gradient de valeur, ou encore la fréquence des escales entre les ports du monde.

La deuxième approche sélectionne et regroupe des trajectoires répondant à des critères en fonction de leurs propriétés. Cette sélection peut porter, selon l'angle d'analyse, sur les caractéristiques des objets mobiles (ses attributs descriptifs) ou sur les trajectoires (localisation géographique, période temporelle) ou même sur la vitesse du mobile. Ainsi, pour les navires, leur taille (longueur, capacité en tonnage), âge (date de construction), lieu d'immatriculation (pays), zone d'étude (monde, bassin méditerranéen, mer Baltique, Asie-Pacifique) et type de cargaison (porte- conteneurs, pétroliers, ferries) sont les aspects les plus courants. Pour le suivi des animaux, on étudie les déplacements selon l'espèce, la période (par exemple la saison) ou la vitesse à laquelle chaque segment est parcouru. Les déplacements sélectionnés peuvent ensuite être cartographiés de façon à comprendre leurs points communs et leurs caractéristiques spatiales.

Ces deux approches peuvent être couplées. Ainsi, la présence de sous-graphes regroupant des nœuds fortement connectés pour des objets ayant des propriétés communes peuvent émerger. Par exemple, l'analyse des circulations des navires ayant fait escale en Corée du Nord a pu montrer la spécialisation géographique croissante des trajectoires. La flotte nord-coréenne tend à privilégier certains *hubs* chinois et russes, tandis que les flottes occidentales passent plutôt par la Corée du Sud (Ducruet *et al.*, 2009). Un autre exemple est l'identification de zones de concentration de positions ou de trajectoires par la méthode des densités de Kernel. On utilise cette méthode sur les flux de navires selon le type de cargaison, pour montrer de fortes spécialisations des couloirs de flux (Le Guyader *et al.*, 2012). Comme évoqué précédemment en référence au projet CLIWOC ou au travail

de Guo *et al*. (2010) sur les trajectoires, d'importants traitements sont nécessaires en amont, somme l'agrégation et la simplification de l'information brute, avant de proposer une cartographie de trajectoires, étapes nécessaires que l'on retrouve en cartographie des flux en général (Bahoken, 2011).

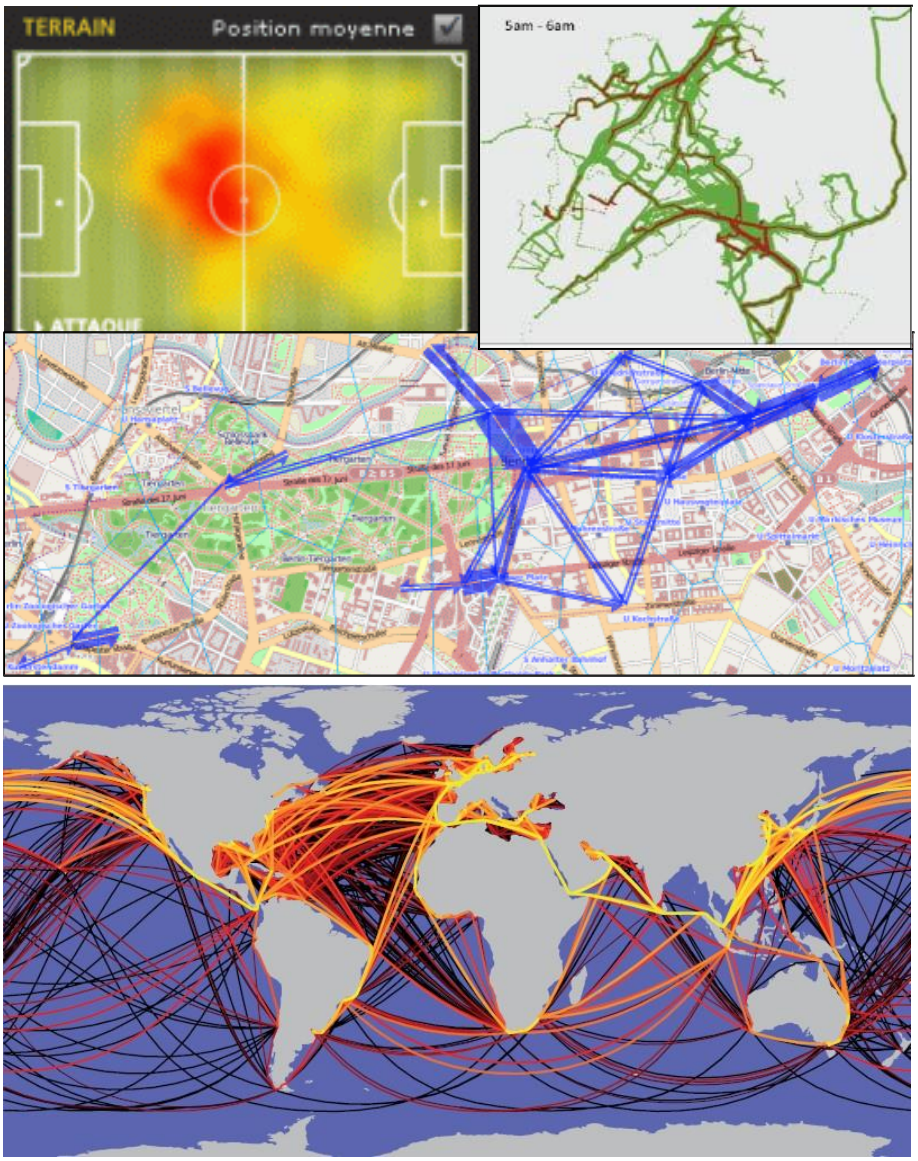


Figure 6. Exemples de cartes de densité de déplacements : présence d'un joueur de football au cours d'un match (haut gauche), trajets de poids lourds (haut droit), flux de piétons (milieu) et fréquence des flux de navires (bas) (Sources : fifa.com ;
Guo et al., *2010; Kaluza* et al., *2010)*

4.2. Les agrégats ou clusters de trajectoires

Une autre technique repose sur l'agrégation de trajectoires : celles-ci peuvent alors être comparées entre elles, particulièrement dans leurs propriétés spatiales. L'objectif est alors d'identifier des motifs, c'est-à-dire soit des lieux fréquentés par un grand nombre d'objets mobiles soit des comportements récurrents.

Les trajectoires d'objets mobiles sont très nombreuses, nous les regroupons pour définir des agrégats (en anglais, on utilise le terme de *cluster* qui apparaît aussi en français) en fonction de critères de similitudes :

– en fonction de critères sémantiques

- entre le type des objets mobiles,

- trajectoires par différentes conditions physiques ou météorologiques,

– fonction de critères spatiaux

- itinéraire suivi par différentes trajectoires,

- forme identique des trajectoires

– en fonction de critères temporels,

– en fonction de critères de périodicité (hiver, été).

Ainsi pour les trajectoires de navires issues des transpondeurs AIS, il est possible de définir des agrégats de trajectoires d'objets de même type de navire reliant deux POI, sans passer par un troisième. Pour cela les trajectoires partant du premier POI et reliant le second d'un même type de navires sont extraites de la base. Par exemple, des motifs récurrents ont pu être identifiés dans le réseau maritime mondial (Kaluza *et al.*, 2010) ainsi que leur fréquence d'apparition dans les flux observés par rapport à celle survenant dans un réseau aléatoire de même taille. Dans un graphe, un motif est une configuration locale récurrente et statistiquement significative de liens entre des sommets pouvant révéler certaines propriétés générales topologiques. Ces motifs identifiés sont ensuite utilisés pour repérer des comportements de déplacement habituels ou inhabituels. Dans le travail d'Etienne (2011), ils ont été employés pour extraire de manière automatique les positions inhabituelles dans un contexte de sécurité maritime.

Les agrégats de trajectoires peuvent également permettre de caractériser des motifs qui sont les lieux récurrents de fréquentation, en complément des origines et des destinations des déplacements. En particulier, nous identifions les lieux fréquentés de manière récurrente par les animaux ; ils sont intéressants dans la mesure où ils reflètent une grande pression animale, et donc potentiellement un lieu où l'occupation du sol varie (il s'agit de l'objectif de cette étude). Par ailleurs, nous distinguons différentes natures de ces lieux de fréquentation : ce sont soit des lieux d'arrêts où les trajectoires ont des vitesses nulles, soit des lieux de passages effectifs qui sont aussi des couloirs (un exemple en figure 7). Il est intéressant de dissocier les deux types de lieux pour expliquer l'attraction de lieux : les premiers lieux sont choisis pour leurs ressources (en végétation et en eau), tandis que les deuxièmes lieux sont moins sélectifs.

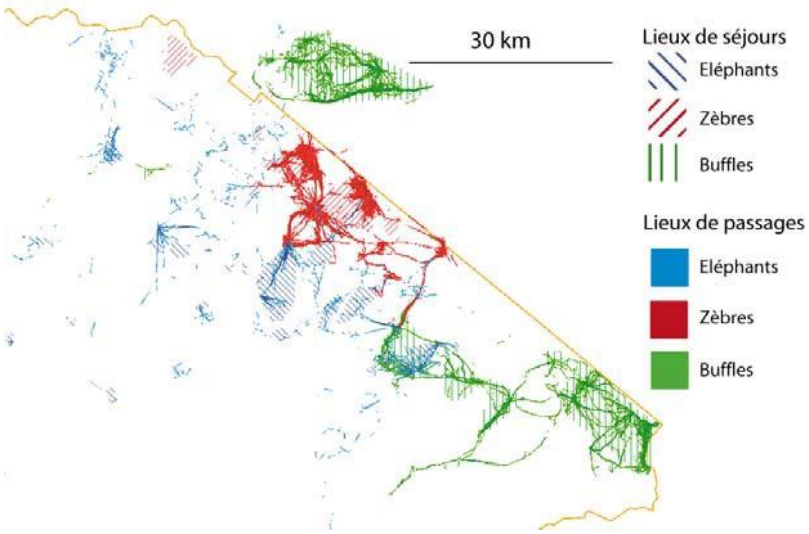


Figure 7. Lieux de fréquentation d'animaux par espèce

Une fois que les agrégats sont définis, il est possible de les caractériser. Une étude spatiale et temporelle montre que ces agrégats ne suivent aucune loi statistique. En effet, les écarts entre les positions médiane et moyenne varient de manière significative au cours de l'itinéraire et la valeur de l'écart type fluctue constamment (voir figure 8). Pour ce type de données spatiotemporelles, les boîtes à moustache définies par (Tukey, 1977) sont employées pour décrire l'évolution de séries temporelles. Ces boîtes représentent le comportement médian, c'est à dire l'écart entre le premier et le neuvième décile afin d'estimer la dispersion autour de la médiane des valeurs et d'isoler les valeurs aberrantes (appelés souvent *outliers*). La figure 8.1 montre plus de 500 trajectoires extraites de la base partant du POI « A » (correspondant au port de Brest) et reliant le POI « F » (port de l'École navale) pour les navires à passagers. Plus la zone est bleue foncée, plus la densité de trajectoires est forte (Etienne, 2011). Malgré le fait que les navires se déplacent dans un espace ouvert, leurs trajectoires sont optimisées et fort semblables.

Une extension a été proposée dans (Etienne, 2011) pour identifier des couloirs spatiaux et temporels, autrement dit des motifs récurrents. Pour cela, il calcule une trajectoire médiane pour chaque agrégat de trajectoires (représentée par la trajectoire verte de la figure 8.2 pour l'exemple). Une fois cette trajectoire définie, pour chaque position médiane, un écart spatial est spécifié à l'aide des positions à droite et à gauche et d'un décile défini empiriquement. Ces écarts reliés selon l'ordre temporel forment un couloir spatial (en rouge sur la figure 8.2). De la même façon, un couloir temporel peut être calculé en fonction du retard ou de l'avance de chaque position par rapport à la position médiane associée. Le motif spatiotemporel de l'agrégat de trajectoire peut être également représenté en 3D (bas de la figure), l'axe Z représentant le temps relatif écoulé depuis le départ (en jaune la trajectoire médiane, les rectangles verts représentent les écarts toléré autour de positions médianes, les deux traits rouges au-dessus et les deux traits verts en dessous délimitent le couloir spatiotemporel). Ici, la trajectoire de couleur cyan a des positions inhabituelles à droite du couloir vers le POI de départ et la trajectoire violette a des positions inhabituelles du fait du retard.

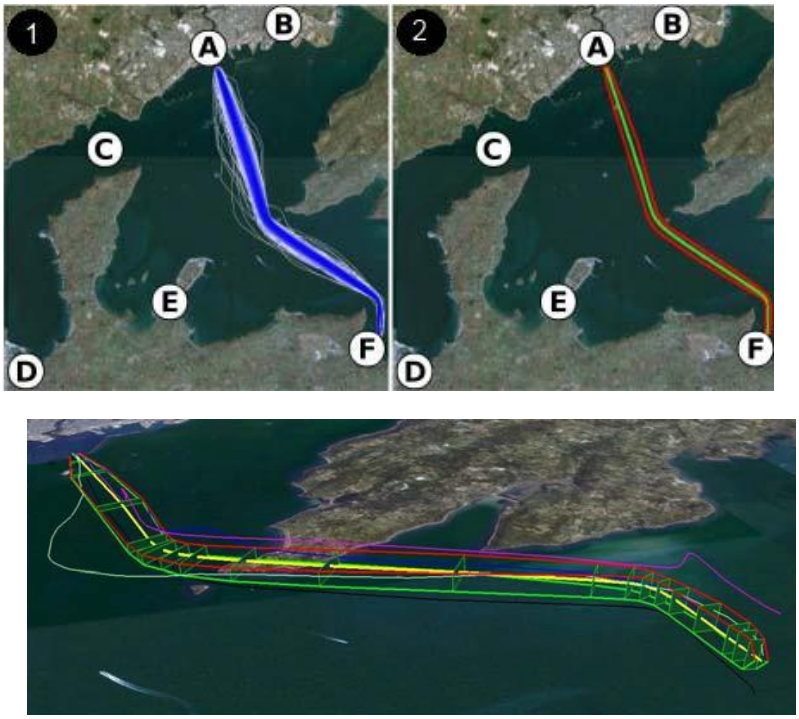


Figure 8. Agrégats de trajectoires de navires dans la rade de Brest en fonction des types de navires et de l'itinéraire (haut). Motif spatiotemporel représenté en 3D du cluster de trajectoires (bas). A B C D E et F sont des points de repère de l'espace support

D'autres méthodes issues de l'analyse de réseau ont été appliquées aux matrices de flux afin de révéler et d'identifier des communautés ou agrégats, le but étant de vérifier par exemple le rôle de la proximité géographique dans le regroupement des positions, ou encore la régionalisation des flux dans le réseau, comme dans le cas des flux de poids lourds montrant une forte logique spatiale des clusters (Guo *et al*., 2010) (voir figure 9). On a pu aussi mettre en évidence un double effet de régionalisation et de spécialisation des flux maritimes mondiaux à partir de la circulation d'environ vingt mille navires sur une période de deux mois (Ducruet,
2013b).

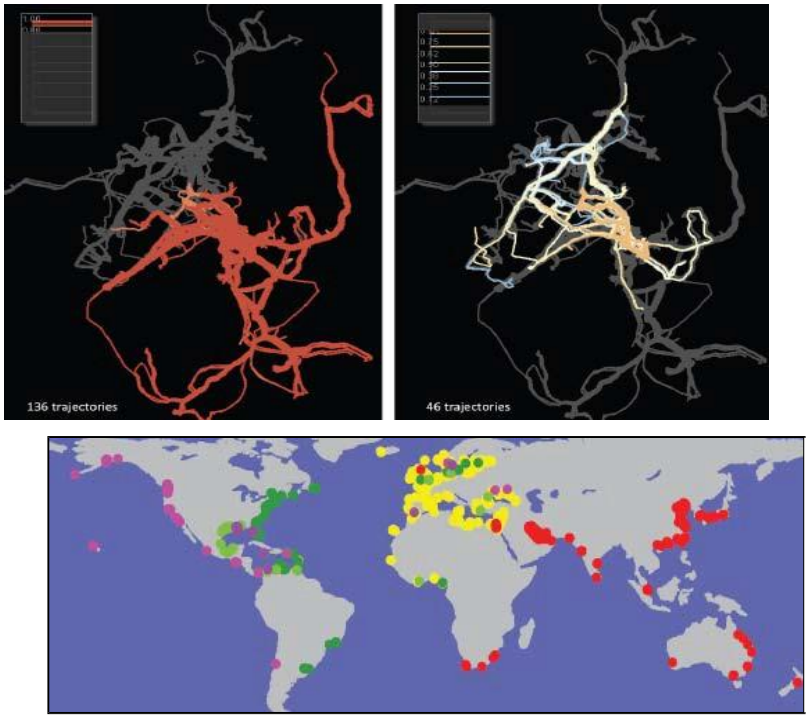


Figure 9. Exemples d'agrégats de trajectoires de navires obtenus à partir de l'analyse de réseau sur les déplacement de navires pétroliers (haut) et de poids lourds (bas) (Sources : Kaluza et al.*, 2010; Guo* et al.*, 2010)*
N.B. pour les navires comme pour les camions, une variation de couleur met en valeur les différents clusters obtenus après partitionnement du graphe respectif

4.3. Prédiction de déplacements

L'analyse des trajectoires parcourues à une certaine période dans le passé peut également servir à prédire des déplacements futurs. Pour estimer les prochains déplacements, des caractéristiques communes des conditions de déplacements passés et futurs sont dégagées : évènements ponctuels, temporalités cycliques, météorologie, moyen de transport ou lieux. Ici, l'objectif est de proposer de nouveaux aménagements pour faciliter ou orienter les flux, donc à un niveau collectif. A l'heure actuelle, les applications sont principalement urbaines. Par exemple, elles sont liées à :

– l'aménagement de l'espace dans les stations de métros ou d'aéroports (Nakanishi *et al.*, 2009),

– la régulation des flux de trafic routier ou de piétons (Tom *et al.*, 2008) ou

– l'optimisation du nombre d'infrastructures dans les lieux touristiques clés (Languillon-Aussel 2011).

Dans nos applications, nous envisageons plusieurs cas qui visent à prédire. L'analyse de la circulation mondiale quotidienne des navires porte-conteneurs au cours d'un mois en 1996, 2006 et 2011 a permis de différencier ports et pays du monde par rapport au temps moyen d'escale et de déceler des évolutions possibles en lien avec le contexte socio-économique local (Ducruet et Merk, 2013).

Pour améliorer les flux maritimes, des systèmes d'alerte peuvent être mis en place, dès qu'un navire s'écarte du déplacement normal calculé. La détection de trajectoires exceptionnelles d'objets mobiles (le comportement normal ayant déjà été identifié) peut permettre, par exemple :

– de mieux comprendre le phénomène de congestion intra-portuaire, fortement lié aux retards que peuvent prendre certains navires (surtout dans le secteur de la ligne régulière, où les dates et horaires d'arrivée sont prévus ce qui n'est pas le cas du vrac qui

fonctionne à la demande), bien plus qu'aux problèmes à terre du pré- et post-acheminement (fleuve, route, rail) ;

– d'identifier des comportements suspects du point de vue de la circulation de marchandises illicites (ex : armes de destruction massive, drogue), notamment mettant en contact des ports et/ou pays déjà soupçonnés. L'identification d'un navire au comportement inhabituel peut donc aider les services de renseignement à arrêter un flux potentiellement dangereux.

Pour connaître les déplacements d'animaux sur la saison sèche de 2014, on peut utiliser l'analyse des trajectoires GPS acquises sur l'année 2009 et la saison sèche de 2009, à condition que les années 2009 et 2014 répondent aux mêmes conditions pluviométriques. Cette étude peut permettre de rééquilibrer l'alimentation en eau des différents points d'eau.

5. Conclusion et perspectives

En conclusion, différentes méthodologies permettent d'identifier des patterns de déplacements des objets mobiles : l'analyse spatiale ou la géovisualisation, l'identification d'agrégats de trajectoires et de trajectoire type ou l'identification de lieux et de période de temps particulièrement fréquentés par les objets mobiles.

Ces motifs sont construits à partir d'un certain nombre de positions enregistrées et d'objets suivis. Ils servent ensuite à élaborer un modèle de référence sur les régularités des trajectoires en termes de fréquence et de motifs. Ce modèle pourrait être comparé à des situations observées, sur d'autres objets mobiles ou d'autres périodes.

La grande difficulté commune aux travaux cités est de qualifier la dynamique des déplacements. Nombreuses sont les analyses qui, faute d'outils conceptuels et techniques appropriés, sous-exploitent des données en très grand nombre, très riches sémantiquement et qui rendent compte d'une dynamique. En conséquence, ce champ de recherche est encore fragmentaire et très majoritairement exploratoire.

6. Bibliographie

Bahoken F. (2011). Représentation graphique des matrices. Graphe et/ou carte des flux ?, *Synthèse du groupe Flux, Matrices, Réseaux (FMR)*, novembre, disponible sur HAL-SHS.

Banos A., Lassarre S. (2008) Simuler les interactions piétons-automobilistes dans un environnement urbain : une approche à base d'agents. *Territoire en Mouvement*, 1, p. 58-66.

Bertrand F., Bouju A., Claramunt C., Devogele T., Ray, C. (2007). Web Architecture for Monitoring and Visualizing Mobile Objects in Maritime Contexts. *In Web and wireless geographical information systems*, LNCS, vol. 4857, Springer, p. 94-105.

Bonnet E., Lassarre S. (2008). Analyse spatiale des déplacements des piétons en milieu urbain du point de vue des traversées afin d'évaluer l'exposition au risque d'accident. *Territoire en Mouvement*, 1, p. 2-13.

Buard E., Brasebin M. (2011). Visual exploration of large animal trajectories. *25th International Cartographic Conference* (ICC'11).

Buard E. (2013). *Dynamiques des interactions espèces – espace, Mise en relation des pratiques de déplacement des populations d'herbivores et de l'évolution de l'occupation du sol dans le parc de Hwange (Zimbabwe)*. Thèse en géographie, Université Paris 1.

Buard E. (2012). Localisation des troupeaux d'herbivores au Zimbabwe : composer avec l'imprécision. *Mappemonde, 107*.

Buard E. (2011). Pratiques spatiales des populations animales: analyses par les trajectoires. *Dixièmes Rencontres de Théo Quant*, Besançon, 23-25 février.

Cheylan J.P. (2007). Les processus spatio-temporels: quelques notions et concepts préalables à leur représentation, *Mappemonde*, vol. 87, n° 3, http://mappemonde.mgm.fr/num15/articles/art07303.html

Ducruet C., Merk, O. (2013). Examining container vessel turnaround times across the world, *Port Technology International*, 59, http://issuu.com/henleymedia/docs/pti59_lr2/1?e=1254810/4913463

Ducruet C., Notteboom T.E. (2012). The worldwide maritime network of container shipping: spatial structure and regional dynamics, *Global Networks*, vol. 12, n° 3, p. 395-423.

Ducruet C. (2013a). Histoire maritime et cartes en ligne, du XVI^{e} au XXI^{e} siècle, *Mappemonde*, 109, http://mappemonde.mgm.fr/num37/internet/int13101.html

Ducruet C. (2013b). Network diversity and maritime flows, *Journal of Transport Geography*, 30, p. 77-88.

Ducruet, C., Roussin, S., Jo, J.C. (2009) Political and economic factors in the evolution of North Korea's maritime connections, *Journal of International Logistics and Trade*, vol. 7, n° 1, p. 1-23.

Dykes J.A., Mountain D.M. (2003). Seeking structure in records of spatio-temporal behaviour: visualization issues, efforts and application. *Computational Statistics and Data Analysis*, vol. 43, n° 4, p. 581-603.

Eliot E., Daudet E. (2006). Diffusion des épidémies et complexités géographiques : perspectives méthodologiques, *Espace, Populations et Sociétés*, 2-3, p. 403-416.

Elissalde B., Lucchini F., Freiré-Diaz S. (2011). Mesurer la ville éphémère, in Pumain D. et Mattei M.F. (dir.) *Données Urbaines 6*, Paris, Anthropos, p. 105-122.

Etienne L. (2011). *Motifs spatio-temporels de trajectoires d'objets mobiles, de l'extraction à la détection de comportements inhabituels. Application au trafic maritime*. Thèse d'informatique, Université de Bretagne Occidentale.

Guo D., Liu S., Jin H. (2010). A graph-based approach to vehicle trajectory analysis, *Journal of Location Based Services*, 4, p. 183-199.

Hägerstrand T. (1970). What about people in regional science?, *Papers of the Regional Science Association*, 24 (1): 6–21.

Hurez C., Baroudi G. (2010). Les pulsations urbaines. Localisation spatiale et temporelle des personnes et des voitures à partir des enquêtes ménages déplacements. *Le CFC*, n° 206, p. 21-26.

Kaluza P., Kölzsch A., Gastner M.T., Blasius B. (2010). The complex network of global cargo ship movements, *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 7, n° 48, 1093-1103.

Kharrat A., Popa I. S., Zeitouni K., Faiz S. (2008). Clustering algorithm for network constraint trajectories, in *Clustering Algorithm for Network Constraint Trajectories*, p. 631-647. Springer Berlin Heidelberg.

Knorr E.M., Ng R.T., Tucakov V. (2000). Distance-based Outliers: Algorithms and Applications. *The VLDB Journal*, vol. 8, n° 3-4, p. 237-253.

Languillon-Aussel R. (2011). Tôkyô Disney Resort et Disneyland Resort Paris : deux modèles originaux d'aménagement touristique au Japon et en France, *Geoconfluences*, novembre.

Laube P.**,** van Kreveld M., Imfeld S. (2004). Finding REMO - detecting relative motion patterns in geospatial lifelines. *Developments in Spatial Data Handling*, Proceedings of the 11th International Symposium on Spatial Data Handling, In Fisher, P. F., ed., p. 201-214. Springer, Heidelberg.

Lee J.G., Han J., Li X. (2008). Trajectory Outlier Detection: A Partition-and-Detect Framework, *in Data Engineering, IEEE 24th International Conference on Data Engineering*, p. 140-149.

Le Guyader D., Brosset D., Gourmelon F. (2012). Exploitation de données AIS (Automatic Identification System) pour la cartographie du transport maritime, *M@ppemonde*. http://mappemonde-archive.mgm.fr/num32/articles/art11405.html

Lenntorp B. (1976). Path in Space-Time Environments. *A Time-Geographic Study of Movement Possibilities of Individuals*, Meddelanden fran Lunds universitets geografiska institution, Avhandlingar LXXVII, Lund.

Lévy J. (2004). Essences du mouvement, *Les sens du mouvement*, Allemand S., Ascher F. et Lévy J. (dir), Editions Belin, p. 298-307.

Meratnia N., By (de) R.A. (2004). Spatiotemporal compression techniques for moving point objects. *Advances in database technology (EDBT): proceedings of the 9th international conference on*

extending database technology, LNCS 2992, Springer, p. 765-782.

Moisuc B., Davoine P., Gensel J., Martin H. (2005). GenGHIS. Un outil de modélisation spatio-temporelle pour le suivi historique des risques naturels, *Ingénierie des Systèmes d'Information*, vol. 10, n° 4, p. 35.

Nakanishi H., Ishida T., Koizumi S. (2009. Virtual Cities for Simulating Smart Urban Public Spaces, *In Handbook of Research on Urban Informatics: The Practice and Promise of the Real-Time City*, Chapter XVIII, p. 256-268, IGI Global.

Pfoser D., Theodoridis Y. (2003). Generating semantics-based trajectories of moving objects. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 27, n° 3, p. 243-263.

Rodrigue J.P., Comtois C., Slack B. (2009). *The geography of transport systems*, Routledge, New York.

Spaccapietra S., Parent C., Damiani M., De Macedo J., Porto F., Vangenot C. (2008). A conceptual view on trajectories. *Data & Knowledge Engineering*, vol. 65, n° 1, p. 126-146.

Tom A., Auberlet J.-M., Brémond R. (2008). Approche psychologique de l'activité de traversée des piétons - Implications pour la simulation, *Recherche Transports Sécurité*, 101, p. 265-279.

Tukey J.W. (1977). *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley.

Viana W., Miron A.D., Moisuc B., Gensel J., Villanova-Oliver M., Martin H. (2011). Towards the semantic and context-aware management of mobile multimedia. *Multimedia Tools Appl.*, vol. 53, p. 391-429, June.

Wan T., Zeitouni K., Meng X. (2007). An OLAP System for Network-Constrained Moving Objects. *Proceedings of the 2007 ACM symposium on Applied computing*, p. 13-18, New York, NY, USA.