



HAL
open science

eSTIMe: une approche visuelle, interactive et modulaire pour l'analyse multi-points de vue des mobilités quotidiennes

Aline Menin, Sonia Chardonnel, Paule-Annick Davoine, Michael Ortega,
Etienne Duple, Luciana Nedel

► To cite this version:

Aline Menin, Sonia Chardonnel, Paule-Annick Davoine, Michael Ortega, Etienne Duple, et al.. eSTIMe: une approche visuelle, interactive et modulaire pour l'analyse multi-points de vue des mobilités quotidiennes. 15th Spatial Analysis and Geomatics (SAGEO), Nov 2019, Clermont-Ferrand, France. hal-02342935

HAL Id: hal-02342935

<https://hal.science/hal-02342935>

Submitted on 1 Nov 2019

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.

eSTIMe : une approche visuelle, interactive et modulable pour l'analyse multi-points de vue des mobilités quotidiennes

Aline Menin¹, Sonia Chardonnel²,
Paule-Annick Davoine^{1,2}, Michael Ortega¹,
Etienne Dublé¹, Luciana Nedel³

1. Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LIG, 38000 Grenoble, France
pre.nom@univ-grenoble-alpes.fr

2. Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Science Po Grenoble, PACTE, 38000
Grenoble, France
sonia.chardonnel@univ-grenoble-alpes.fr

3. Federal University of Rio Grande do Sul, Institute of Informatics, Porto
Alegre, Brazil
nedel@inf.ufrgs.br

RÉSUMÉ. Nous proposons un environnement de géovisualisation qui vise à accompagner l'analyse de la mobilité quotidienne selon trois points de vues : les déplacements et les flux, les trajectoires individuelles, et la dynamique de peuplement du territoire. Chacun de ces points de vue s'appuie sur la définition d'indicateurs spécifiques qui font l'objet de représentations visuelles innovantes. L'approche choisie pour favoriser l'analyse visuelle repose sur le concept de tableaux de bord modulables et mobilise des techniques issues du domaine de la visualisation et de l'interaction homme-machine.

ABSTRACT. We propose a geovisualization environment to assist the analysis of daily mobility data focused on three standpoints: the flows and displacements, the individual trajectories, and the territory settlement dynamics. We derive specific indicators from the data to study these aspects, which we explore through synchronized novel visual representations displayed on analytic flexible dashboards. Our approach combines concepts and techniques from visualization and human-computer interaction domains.

MOTS-CLÉS : mobilité quotidienne, géovisualisation, analyse geovisuelle, tableau de bord analytique, données spatio-temporelles

KEYWORDS: daily mobility, geovisualization, spatio-temporal data, geovisual analysis, analytical dashboard

1. Introduction

L'intérêt pour l'analyse de données décrivant la mobilité quotidienne des populations est aujourd'hui partagé par de nombreux domaines au sein des politiques urbaines : offre de transport, accessibilité aux services urbains, environnement (qualité de l'air), santé publique et bien-être (modes actifs, environnements adaptés, sécurisés). De ce fait, beaucoup d'experts (chargés d'études et diagnostics, gestionnaire des collectivités territoriales) ont besoin de manipuler des données de mobilité - sans être des spécialistes du transport - pour extraire des connaissances synthétiques et facilement exploitables. Les jeux de données décrivant les déplacements quotidiens proviennent aujourd'hui de sources diversifiées telles que des enquêtes en population (enquêtes ménages déplacements, enquêtes assistées par GPS) ou des corpus de «traces» d'activités géolocalisées extraits des *Call Detail Record* (télécommunications) ou des réseaux sociaux. La plupart du temps, l'approche commune utilisée pour formaliser la description des déplacements d'un individu à partir de ces données consiste à générer une chronique (par exemple de 24 heures) d'activités et de déplacements spatialisés et enrichis sémantiquement (type d'activité, modes de déplacements). En ressort une structure classique (Peuquet, 1994) permettant d'explorer des entités d'intérêts dans le temps et dans l'espace à différents niveaux d'agrégation. Pour traiter ces données spatio-temporelles, les environnements de géovisualisation et d'analyse exploratoire dédiés à l'étude des mobilités quotidiennes se sont multipliés. L'apport majeur de ces outils est notamment de mieux donner à voir la dynamique du phénomène en proposant des indicateurs et des méthodes de visualisations intégrant le temps. Dans le domaine de l'expertise des politiques urbaines les exploitations des données privilégient l'entrée par les déplacements et les flux, même si les méthodes d'analyses et de représentations des dynamiques du territoire sont aussi exploitées pour l'action (Armoogum *et al.*, 2015; Hurez, Pélata, 2016). Plus généralement, beaucoup d'environnements existants sont conçus avant tout pour résoudre un problème spécifique, comme la détection d'embouteillages, l'exploration de l'utilisation de systèmes de vélos partagés (Yan *et al.*, 2018), l'étude de la ségrégation sociale dans une région métropolitaine (Le Roux *et al.*, 2017) ou encore l'analyse de trajectoires de vie ou de déplacements individuels (Cochey, Tabaka, 2007; Thudt *et al.*, 2013; Otten *et al.*, 2015). Par ailleurs, la plupart de ces environnements privilégient une seule forme de visualisation centrée soit sur la représentation des dynamiques du territoire (avec des cartes dynamiques par exemple (L. Shi *et al.*, 2017)), soit sur celle des individus en mouvement (avec des vues en 3D de trajectoires dans un cube spatio-temporel (Tominski *et al.*, 2012)). A notre connaissance, il n'existe pas d'outil donnant la possibilité aux experts d'appréhender dans un même environnement à la fois des indicateurs synthétiques résumant les caractéristiques des déplacements et des flux, mais aussi des analyses et visualisations représentant le caractère dynamique du phénomène de mobilité à l'échelle des individus et des territoires.

Dans cet article, nous présentons l'approche *eSTIMe* (Spatio-Temporal Exploration of Individual Mobility data) qui vise à accompagner l'analyse de la mobilité quotidienne selon trois points de vues : les déplacements et les flux, les trajectoires individuelles, et la dynamique de peuplement du territoire. Nous décrivons dans un premier temps l'approche qui sous-tend notre proposition, à savoir les attendus des utilisateurs et les principes de visualisation et d'interaction. Dans une seconde partie, nous décrivons, à partir d'un jeu de données implémenté, les différents indicateurs de mobilité et les visualisations associées, avant de présenter l'architecture de l'environnement. Dans une dernière partie sont discutés les résultats des expérimentations menées auprès de plusieurs groupes d'utilisateurs.

2. Approche conceptuelle

2.1. Attendus

Les analyses de la mobilité quotidienne gagneraient à être développées selon des points de vues complémentaires permettant d'analyser dans un même environnement de travail des déplacements, des trajectoires individuelles et des dynamiques de peuplement. Les déplacements résumés par des indicateurs synthétiques (taux de mobilité, parts modales...) sont une première approche des tendances générales des pratiques de mobilité à l'échelle d'un territoire. Les flux, construits par agrégation des déplacements entre deux zones, révèlent la structure des liens entre les sous-espaces du territoire. L'analyse des trajectoires individuelles aide à comprendre comment les individus ordonnent leurs activités et déplacements au fil du temps dans le contexte spatial du territoire. Des typologies de trajectoires (Robette, 2011) peuvent par exemple être élaborées pour dresser des profils d'emplois du temps. Enfin, l'analyse de l'évolution (au cours de la période d'observation) de la densité de présence des individus dans chaque sous-espace (tenant compte de leur mobilité) permet de comprendre les rythmes du territoire et de sa population.

Dans ce contexte, les spécifications qui ont guidé la conception et la réalisation de notre environnement de visualisation sont les suivantes : (1) décrire la mobilité quotidienne selon plusieurs points de vue à travers l'analyse et la comparaison de différents indicateurs au niveau individuel et global qui se complètent mutuellement ; (2) explorer les indicateurs de mobilité dans le temps afin d'identifier les rythmes quotidiens de la ville et de sa population ; (3) donner à l'utilisateur la possibilité de composer «à façon» son environnement visuel en choisissant les indicateurs, les ensembles spatiaux et les périodes temporelles qu'il souhaite analyser et comparer. Partant de ces trois premières spécifications, nous fondons notre proposition sur les principes de l'analyse visuelle, définie comme la capacité à traiter visuellement des données au moyen d'un environnement logiciel et d'en extraire de l'information (Cook, Thomas, 2005). Disposer d'un environnement support à l'analyse visuelle qui intègre différents points de vue implique de s'interroger sur (1) la façon dont les diffé-

rents indicateurs de la mobilité peuvent être représentés visuellement ; (2) les processus d'interactions entre visualisation et utilisateur.

2.2. *Principes et proposition*

Nous proposons d'utiliser une approche par tableau de bord reconnue pour favoriser l'analyse visuelle des données quantitatives en les rendant interprétables au moyen de représentations visuelles (Kitchin *et al.*, 2015). Cette approche repose sur le principe de la co-visualisation au sein d'une interface commune, de représentations graphiques dynamiques, interactives et interconnectées entre elles. Chaque graphique représente un indicateur synthétique issu des traitements statistiques appliqués aux jeux de données brutes. L'utilisateur interroge et visualise les indicateurs aux moyens des représentations graphiques en fonction de ses questionnements. Les tableaux de bord analytiques offrent la possibilité de mettre en relation les indicateurs, de les comparer, d'explorer différentes combinaisons au gré de son analyse pour en extraire des patterns et des tendances (Rivard, Cogswell, 2004). Appliqués à la gestion de données urbaines, ils constituent des outils très puissants car ils fournissent très rapidement et efficacement des informations sur les différents aspects d'un système urbain et de ses changements (Kitchin *et al.*, 2015). Ces tableaux de bord sont généralement déployés sur plusieurs écrans en raison de la multiplicité des indicateurs à visualiser (Langner *et al.*, 2019). Par ailleurs, (Pagno *et al.*, 2015) recommandent l'utilisation d'appareils mobiles pour interagir avec les écrans et (Kister *et al.*, 2017) proposent des techniques interactives combinant écran mural et appareils mobiles pour faciliter l'analyse visuelle. Partant de ces recommandations, nous pensons qu'en déportant les processus d'interaction entre l'utilisateur et les représentations graphiques (effectués généralement avec la souris) sur une tablette interactive et connectée à de multiples tableaux de bord *modulables*, il est possible de (1) bénéficier d'un plus large espace d'affichage ; (2) renforcer les capacités interactives de l'application et donc accroître le pouvoir exploratoire de l'environnement.

Une des problématiques récurrentes concerne la visualisation des dynamiques spatio-temporelles. Celles-ci sont généralement représentées au moyen de visualisations associant des cartes animées et des graphiques temporels (timelines ou timewheels) eux-mêmes interactifs et/ou animés (Edsall, Peuquet, 1997). Néanmoins, "leur perception est confrontée à des limites cognitives, d'inhibition rétroactive ou de concurrence entre stimuli"(Saint-Marc, 2017). Dans la plupart des cas, ces diagrammes temporels jouent essentiellement un rôle de support pour interroger et filtrer les données. Ils sont basés sur l'existence de liens dynamiques entre cartes et diagrammes, et la technique du brushing (Kaddouri *et al.*, 2014). Nous proposons de déporter les processus de filtrage et de visualisation spatio-temporelle sur le dispositif mobile interactif, et d'y intégrer une technique d'animation basée sur le mouvement de la tablette, lui-même dirigé par l'utilisateur. Les angles d'inclinaison de la tablette correspondent alors aux périodes temporelles et l'animation cartographique associée

est contrôlée via le mouvement effectué par l'utilisateur (Menin *et al.*, 2018). L'interaction corporelle effectuée lors de l'oscillation de la tablette, associant la position et l'orientation des poignets lors de la recherche d'information, tend à favoriser la mémorisation de l'information (Arvola, Holm, 2014).

3. L'environnement eSTIME

3.1. *Les données mobilisées*

L'environnement eSTIME est conçu de manière générique pour accueillir différentes sources de données de mobilité. Pour l'heure nous avons implémenté les données de l'édition 2010 de l'enquête ménages et déplacements (EMD) réalisée auprès d'un échantillon représentatif de la population de la région métropolitaine grenobloise (354 communes) découpée en 97 secteurs de tirage (CEREMA, 2010). Tous les membres de plus de cinq ans des ménages interrogés décrivent l'ensemble de leurs déplacements effectués pendant les 24 heures précédant le jour de l'enquête (de 4 h la veille à 4 h le jour même), tous motifs et tous modes confondus. L'enquête a été menée auprès de 7 600 ménages, soit 16 000 personnes interrogées ayant effectué plus de 62 000 déplacements en une journée. Des coefficients de redressement, basés sur la commune de résidence, la taille et la motorisation des ménages, sont ensuite appliqués à l'échantillon qui représente ainsi 800 000 personnes générant un peu plus de 2,8 millions de déplacements par jour ouvré. Nous utilisons les données redressées, définies sur trois niveaux d'agrégations spatiales: 97, 39 et 12 secteurs.

3.2. *Les indicateurs et représentations associées*

Comme énoncé auparavant, l'environnement eSTIME permet aux utilisateurs d'analyser la mobilité selon des points de vue complémentaires : déplacements et flux; dynamiques de peuplement du territoire; trajectoires individuelles. Dans les trois cas, les données peuvent être explorées par l'intermédiaire de visualisations représentant les indicateurs définis à différents niveaux d'agrégations spatiales et temporelles, et selon deux entrées thématiques : les activités appelées « motifs » dans l'EMD (5 modalités : domicile, travail, études, courses et loisirs) et les modes de transport (4 modalités : automobile, vélo, marche à pied et transport en commun). Des données décrivent aussi les profils sociaux des individus : elles sont utilisées pour l'analyse des trajectoires individuelles.

– **La carte** : les dynamiques de peuplement sont représentées à travers des indicateurs qui traduisent la présence au sein du territoire de la population selon différentes périodes de la journée : la densité de présence, qui décrit le rapport entre le nombre de personnes présentes dans chaque secteur et sa superficie ; le taux de migration, qui identifie les secteurs qui ont perdu ou gagné de la population au cours de la journée ; l'indice d'attractivité, qui détermine la densité réelle de chaque secteur par rapport à la densité de ses résidents (André-Poyaud *et al.*, 2008) ; le taux d'activités, qui décrit le volume de personnes présentes

dans chaque secteur pour effectuer chaque activité. La visualisation de ces indicateurs, s'effectue de façon classique au moyen de cartes choroplèthes (voir Figure 1a(A)) ou basées sur des symboles proportionnels. Par exemple, la figure A (taux de migration sur 24 heures) permet de distinguer deux pôles "attractifs" (Grenoble et Voiron) gagnant de la population, des secteurs périphériques en perdant beaucoup et enfin des secteurs intermédiaires tel que le Grésivaudan, espace périurbain proche de Grenoble pour lequel nous décrirons par la suite comment sa population organise ses activités et ses déplacements quotidiens.

– **Le chronogramme** : Cette visualisation permet d'explorer les patterns des activités réalisées par l'ensemble de la population sur le territoire étudié pendant la journée. Il se présente sous la forme d'un graphique à bandes empilées, pour lequel l'axe des abscisses représente le temps et l'axe des ordonnées représente la proportion de personnes par activité (Pistre *et al.*, 2015). La figure 1a (B) illustre le rythme global de la population du Grésivaudan qui pour près de 70% est sortie de son domicile à 9h00 du matin afin de travailler, étudier et pour une plus faible part (10%) faire du shopping et des loisirs, avant de progressivement (entre 16h00 et 19h00) arrêter le travail au profit pour une part des activités de loisirs jusqu'à 22h00, heure où l'ensemble la population est de retour au domicile.

– **La roue de mobilité** : les pratiques des personnes mobiles pendant la journée peuvent être explorées à travers la roue de mobilité. Sa conception a été inspirée par les roues temporelles (ou timewheels), souvent utilisées pour visualiser des séries temporelles cycliques (Zhao *et al.*, 2008). Elle consiste d'un diagramme circulaire qui simule une horloge de 24 heures (voir Figure 1a(C)). Il comporte deux anneaux formés par 24 rectangles représentant des périodes d'une heure. Le cercle extérieur de la roue affiche le rapport entre le nombre de personnes en mouvement et la population du secteur sur la période donnée ; le cercle intérieur affiche la répartition des personnes mobiles sur la période donnée selon le motif ou le mode de transport. Enfin, le *pie chart* central présente la distribution temporelle des motifs ou modes de transport. Suivant le rythme des activités de la population du Grésivaudan, les moments de déplacements (figure 1aC) les plus intenses sont entre 8h00 et 9h00, puis entre 16h00 et 19h00 (avec un petit pic sur la pause méridienne). Quant aux modes, l'usage de l'automobile est majoritaire à toutes les heures de la journée.

– **Le diagramme de flux** : il s'agit ici de représenter non seulement les flux de déplacement quotidiens des individus en termes d'origine - destination, mais aussi d'y associer les motifs et les modes de transport, à l'échelle de la journée, ou par plage horaire. Certes les cartes de flux sont une technique largement utilisée pour visualiser les déplacements des individus, mais elles présentent des contraintes qui affectent leur lisibilité (Bahoken, 2016). Nous représentons donc les flux entre les secteurs au moyen d'un diagramme de cordes, de manière similaire à ce qui est fait par (X. Shi *et al.*, 2017). Les arcs représentent les secteurs géographiques qui sont reliés entre eux par des rubans dont l'épaisseur décrit le volume d'échanges de flux entre deux secteurs. Cette visualisation

peut être générée de façon globale pour l'ensemble des flux, ou de façon plus spécifique pour les flux selon leurs motifs ou des modes de transport. Dans ce cas, la couleur des rubans et des arcs définit le motif de déplacement ou le mode de transport. Une opération de filtrage peut être réalisée de façon interactive pour afficher seulement les rubans reliés à l'arc d'un secteur choisi, ainsi que des détails sur les flux (entrants ou sortants) reliés à ce secteur. Globalement, les flux du Grésivaudan sont soit internes, soit reliés aux secteurs centraux de la ville de Grenoble et des communes de son agglomération (Figure 1b (gauche)). Si l'on distingue les motifs de déplacements, on remarque que les flux vers le travail partent massivement du Grésivaudan pour rejoindre les communes de l'agglomération hors Grenoble alors que les flux des loisirs sont plus souvent internes au Grésivaudan mais vont aussi vers les secteurs centraux de la ville de Grenoble.

– **Les actogrammes** : la représentation en actogramme montre l'ordre temporel des activités d'une personne au cours d'une journée (Chardonnel *et al.*, 2010). Chaque individu de l'enquête est représenté par une ligne et chaque ligne est composée de segments de couleurs différentes. La couleur correspondant à l'activité réalisée. L'abscisse représentant le déroulement temporel des trajectoires montre le moment et la durée de l'activité. La superposition des individus en ligne, autrement appelé tapis, permet de comparer visuellement les séquences entre elles. L'utilisateur peut aussi visualiser les résultats d'une analyse de similarités de séquences (basées sur l'*Dynamic Hamming Distance*) en affichant le tapis de chaque groupe de la typologie. Ainsi, la figure 1c(gauche) montre le résultat d'une classification réalisée sur un échantillon de la population de l'enquête caractérisée par son utilisation quotidienne de la voiture. Les actogrammes des deux groupes montrent clairement deux structures de trajectoires distinctes : la première est ordonnée par l'activité travail qui débute entre 8h00 et 9h00 et se termine vers 17h00 offrant des possibilités d'activités plus variées avant un retour massif aux domiciles vers 20h00 ; la seconde dont le pattern est moins "net" illustre des emplois du temps plus diffus dans le temps avec soit des activités d'études ou de travail, soit des loisirs.

– **Le cube spatio-temporel (STC)** : pour compléter l'approche par les actogrammes qui montrent uniquement la dimension temporelle des séquences individuelles, nous utilisons la représentation 3D classique du cube spatio-temporel (Kraak, 2003). Ceci permet d'explorer les formes et l'étendue des trajectoires individuelles dans l'espace et dans le temps. Nous intégrons dans le cube la possibilité de caractériser les trajectoires au moyen de la couleur pour visualiser les activités et les modes de transport qui les composent. L'utilisateur peut explorer un ensemble de trajectoires dans le cube en les sélectionnant en fonction des caractéristiques socio-démographiques des individus. Il peut en outre valoriser le résultat des typologies de séquences (cf. ci-dessus) en affichant les trajectoires spatio-temporelles de chaque groupe. La figure 1c(droite) projette dans l'espace-temps du cube les trajectoires du premier groupe de la typologie de l'échantillon d'automobilistes. Les domiciles sont dispersés sur l'en-

semble du périmètre de l'enquête, alors que l'on observe une concentration des trajectoires sur les secteurs plus centraux, notamment les 2 pôles repérés dans l'actogramme (Grenoble et Voiron) pendant la période consacrée au travail.

3.3. Les interactions

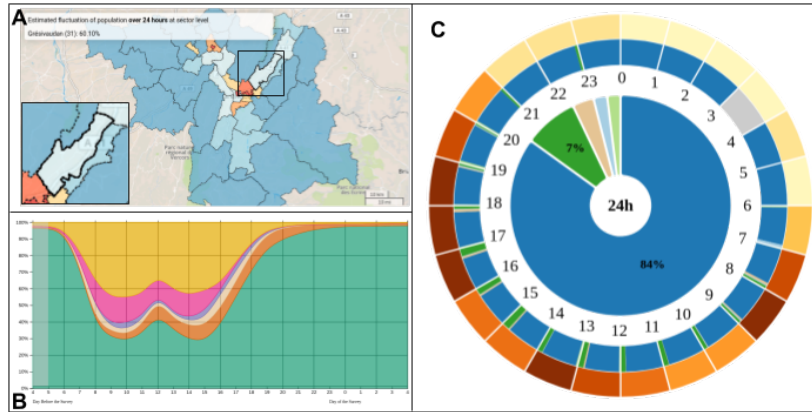
L'application repose sur l'utilisation des techniques d'interactions couramment utilisées dans le domaine de l'analyse visuelle interactive: «pan», zoom, filtrage, sélection spatio-temporelle et attributaires à la demande. Chaque représentation visuelle définie ci-dessus correspond à une vue. Les vues sont interactives et liées entre elles selon la technique *brushing and linking*, de sorte que les modifications réalisées sur une visualisation sont automatiquement répercutées sur les autres visualisations. Nous proposons également de gérer le temps ou l'espace sur les vues de façon indépendante, afin de permettre la comparaison des indicateurs selon différentes granularités spatiales et temporelles.

La carte et le diagramme temporel sont intégrés dans l'interface mobile et jouent le rôle de «contrôleur». Ils prennent en charge les interactions nécessaires à l'exploration des autres vues, en permettant la sélection des zones spatiales et des périodes temporelles selon différentes granularités spatio-temporelles. Rappelons que le diagramme temporel permet la gestion de l'animation cartographique pour la représentation des dynamiques territoriales via le mouvement d'inclinaison de la tablette. Puisque la mobilité quotidienne des individus tend à former des patterns qui se répètent selon un rythme de 24 heures, le diagramme temporel intégré dans le contrôleur peut être de type cyclique (timewheel) ou linéaire (timeline). Du point de vue des interactions, ces deux représentations se différencient par le niveau et la forme d'inclinaison de la tablette: la timewheel requière plus de degrés de liberté en termes de manipulation que la timeline. D'un point de vue fonctionnel, il est possible de déployer les visualisations proposées sur plusieurs tableaux de bord (écrans) connectés au contrôleur. Ceci permet de multiplier les possibilités de visualisation et d'exploration des données. Chaque tableau est composé de quatre fenêtres, initialement vierges, et dans lesquelles l'utilisateur y affiche les indicateurs de son choix, personnalisant ainsi son tableau de bord en fonction de ses besoins d'analyse.

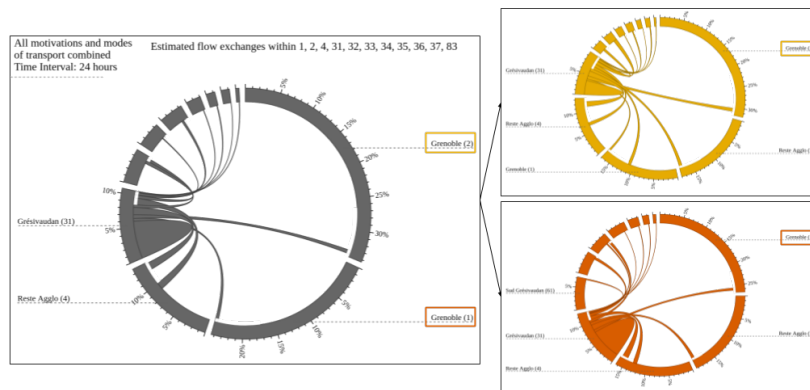
4. Implémentation

L'environnement eSTIME est basé sur l'utilisation d'au moins deux écrans : le premier s'affiche sur une tablette et contient l'interface interactive (appelée le *Contrôleur*) qui intègre les fonctionnalités classiques de navigation et d'exploration des données. Le second écran prend la forme d'un tableau de bord, sur lequel s'affichent et s'organisent les représentations sélectionnées. L'utilisateur peut avoir plusieurs tableaux de bord (et plusieurs écrans) connectés au Contrôleur. L'architecture d'eSTIME (voir Figure 2) est basée sur les technologies Web. Le côté serveur s'appuie sur la technologie WebSocket et est structuré en deux modules : le premier développé en Java gère la communication entre les mul-

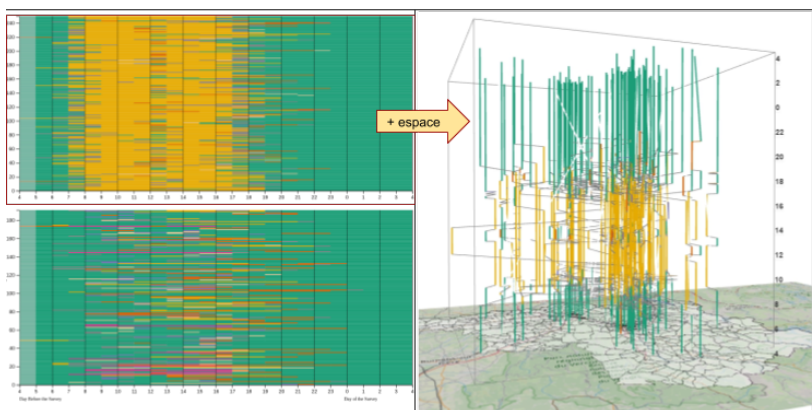
L'analyse visuelle des mobilités quotidiennes



(a) La dynamique de peuplement du territoire est représenté au moyen de cartes choroplèthe (A) et des symboles proportionnels; des chronogrammes (B) ; et via la roue de mobilité (C).



(b) Les flux sont représentés au moyen d'un diagramme de cordes. Les flux arrivant à chaque secteur sont différenciés de ceux qui partent par une lacune blanche entre la corde et l'arc.



(c) Les résultats de la classification des trajectoires sur le temps sont explorés à l'aide des actogrammes (A) et projetés sur l'espace à l'aide du STC (B).

FIGURE (1) Chaque représentation peut supporter les indicateurs caractérisés par des activités/motifs (dans cette figure : domicile, loisirs, courses, études, travail, autres) ou modes de transport (voiture, vélo transport en commun, marche à pied.)

tiples écrans ; le second développé en Python, utilise la bibliothèque OpenGL pour générer le graphique 3D du cube spatio-temporel. Le côté client est développé en Javascript et utilise les bibliothèques D3 (Data-Driven Documents) et Leaflet, pour générer, respectivement, les graphiques et les représentations cartographiques en 2D. Les données sont stockées localement sous la forme de fichiers *geojson* pour les informations spatiales, *json* pour les données de flux, et *csv* pour les autres. Les données sont pré-traitées par des scripts R qui utilisent les packages *Flows* et *TraMineR*. Ce dernier sert à créer les typologies de séquences grâce à l'algorithme *Dynamic Hamming Distance*.

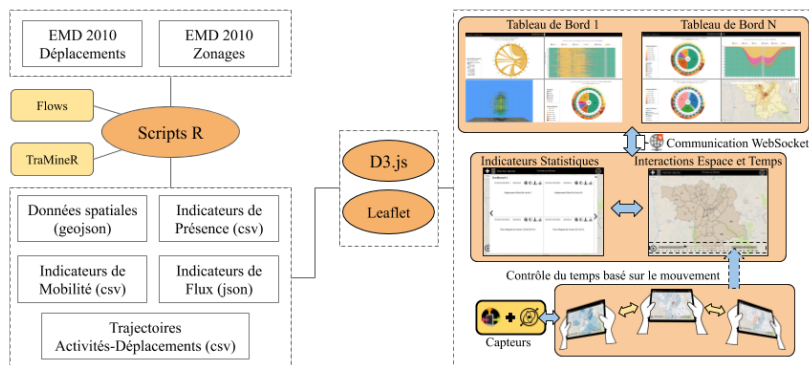


FIGURE (2) Architecture fonctionnelle de l'environnement eSTIME.

5. Résultats des expérimentations

Tout au long du développement d'eSTIME, des expériences ont été menées pour évaluer son ergonomie et son efficacité en termes d'analyse. Les expérimentations ont fait l'objet d'une analyse quantitative et qualitative¹. Nous synthétisons ici les résultats issus de trois expérimentations :

- la première s'appuie sur une analyse qualitative de retours d'expérience effectuée auprès de 13 sujets. Elle a porté sur l'appropriation générale de l'environnement et sur l'utilisation du mouvement pour contrôler l'animation spatio-temporelle, à travers la timeline ou la timewheel. D'une façon générale, l'ergonomie de l'interface a été considérée comme «moyenne» par les sujets, avec une charge cognitive relativement importante. En revanche, les sujets ont répondu correctement aux questions analytiques (précision de 80 pourcent). Lors de cette expérimentation, le contrôle du temps par la timeline a été jugé plus facile qu'avec la timewheel.

- la seconde, réalisée auprès de 17 sujets a consisté à évaluer l'usage du mouvement pour interagir avec le temps (via la tablette). Au cours de cette expérimentation, nous avons comparé quatre techniques d'animation du temps :

1. (Menin *et al.*, 2019) présente la procédure et les résultats en détails.

l'animation interactive traditionnelle contrôlée à la fois par la souris et à la fois par des touches sur l'écran; l'interaction via l'inclinaison de la tablette, à travers le mouvement soit cyclique, soit linéaire. Même si le mouvement cyclique a eu des effets négatifs sur l'exactitude des réponses, l'animation par le mouvement linéaire a été aussi efficace que l'animation interactive classique et les utilisateurs l'ont appréciée.

– la troisième a fait évalué l'efficacité de l'outil à des fins d'analyse de la mobilité par 21 sujets experts du domaine. Cette expérience est basée sur une série de questions analytiques auxquelles les sujets devaient répondre après exploration des données. Les réponses aux questions posées ont été satisfaisantes (avec un score de 80 pourcent de précision). Les utilisateurs ont souligné que l'utilisation de la tablette comme deuxième écran rendait la tâche plus facile. Dans la mesure où il est possible de visualiser les indicateurs sur un écran et interagir sur un autre (en l'occurrence ici la tablette), les utilisateurs ont fait valoir que ce dispositif contribuait positivement à l'analyse visuelle et qu'il pouvait éventuellement réduire les efforts physiques requis autrement pour manipuler la souris.

Globalement, notre approche a été jugée positivement car elle offre une diversité d'analyses visuelles des données de mobilité : les participants (y compris des non-experts) ont été capables de répondre aux questions analytiques simples (ex.: quels sont les secteurs qui attirent de la population?) et complexes (ex.: pour les secteurs les plus attractifs, d'où viennent les personnes sur les périodes de début de journée, de la pause méridienne et de fin de journée?).

6. Conclusion

Nous avons présenté l'approche conceptuelle eSTIME et son implémentation à partir des données d'enquête ménages déplacements. Notre proposition est basée sur le concept de tableau de bord modulable déployé sur un dispositif multi-écrans connecté à une tablette interactive sur laquelle sont déportés les processus d'animation cartographique pour interagir avec la dimension spatio-temporelle de la mobilité. Notre proposition répond à la volonté de développer les capacités d'analyse exploratoire multi-points de vue des environnements de géovisualisation. L'originalité de notre proposition se situe aussi dans l'intégration au sein d'un même environnement de représentations permettant l'analyse à la fois au niveau agrégé (cartes, roue de la mobilité, diagramme de flux, chronogramme) et au niveau individuel (actogramme, cube spatio-temporel). Certaines de ces représentations sont issues d'une adaptation de visualisations existantes tels que le diagramme de flux et le cube spatio-temporel; d'autres sont innovantes, telle que la roue de la mobilité. Enfin, l'ergonomie et l'efficacité de l'outil ont fait l'objet d'expérimentations auprès d'utilisateurs montrant le potentiel de l'approche eSTIME.

7. Remerciement

Ces travaux ont été bénéficié d'un financement doctoral de la Région Auvergne Rhône-Alpes.

Bibliographie

- André-Poyaud I. I., Chardonnel S., Charleux L. L., Tabaka K. (2008). La mobilité au cœur des emplois du temps des citoyens. In F. P. Yves Chalas (Ed.), *La mobilité qui fait la ville*, p. 67-95. CERTU.
- Armoogum J., Guilloux T., Richer C. (2015). *Mobilité en transitions : Connaître, comprendre et représenter*. CEREMA.
- Arvola M., Holm A. (2014). Device-orientation is more engaging than drag (at least in mobile computing). In *Proceedings of the 8th nordic conference on human-computer interaction: Fun, fast, foundational*, p. 939-942.
- Bahoken F. (2016). *Mapping flow matrices, a contribution*. Theses, Université Paris Diderot (Paris 7).
- CEREMA A.-C. (2010). *Enquête Ménages Déplacements (EMD), Grenoble, Grande région grenobloise*.
- Chardonnel S., Charleux L. L., Thibault P. (2010). Analyser les routines dans les emplois du temps par la mesure des concordances d'actogrammes. In *Mobilités urbaines et risques des transports : approches géographiques*, p. 23-50.
- Cochey E., Tabaka K. (2007). Modes de représentation des trajectoires quotidiennes des habitants. In *Huitièmes Rencontres de Théo Quant*.
- Cook K. A., Thomas J. J. (2005). *Illuminating the path: The research and development agenda for visual analytics*. Rapport technique. Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).
- Edsall R., Peuquet D. (1997). A graphical user interface for the integration of time into GIS. In *Proceedings of the 1997 American congress of surveying and mapping annual convention and exhibition*, p. 182-189.
- Hurez C., Pélatà J. (2016). *À la recherche du territoire «pratiqué»*. <http://mappemonde.mgm.fr/118gv7/>. (Accédé le 9 mai 2019)
- Kaddouri L., Blaise J.-Y., Davoine P.-A., Mathian H., Saint-Marc C. (2014). *État des lieux des représentations dynamiques des temporalités des territoires*. Research Report.
- Kister U., Klamka K., Tominski C., Dachselt R. (2017). Grasp: Combining spatially-aware mobile devices and a display wall for graph visualization and interaction. *Computer Graphics Forum*, vol. 36, n° 3, p. 503-514.
- Kitchin R., Lauriault T. P., McArdle G. (2015). Smart cities and the politics of urban data. In *Smart urbanism*, p. 32-49.
- Kraak M.-J. (2003). The space-time cube revisited from a geovisualization perspective. In *The 21st International Cartographic Conference*.

- Langner R., Kister U., Dachselt R. (2019). Multiple coordinated views at large displays for multiple users: Empirical findings on user behavior, movements, and distances. *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, p. 608-618.
- Le Roux G., Vallée J., Commenges H. (2017). Social segregation around the clock in the Paris region (France). *Journal of Transport Geography*, vol. 59, p. 134-145.
- Menin A., Chardonnel S., Davoine P.-A., Nedel L. (2018). Exploring Shifting Densities through a Movement-based Cartographic Interface (Short Paper). In *10th International Conference on Geographic Information Science (GIScience'18)*.
- Menin A., Chardonnel S., Davoine P.-A., Nedel L. (2019). eSTIME: Towards an All-in-One Geovisualization Environment for Daily Mobility Analysis. In *Proceedings of the 32nd Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI'19)*.
- Otten H., Marian D., Boris M. (2015). Are there networks in maps? An experimental visualization of personal movement data. In *Personal Visualization: Exploring Data in Everyday Life*, p. 5-7.
- Pagno B., Costa D., Guedes L., Freitas C. D. S., Nedel L. (2015). Guidelines for designing dynamic applications with second screen. In *2015 XVII Symposium on Virtual and Augmented Reality*, p. 42-51.
- Peuquet D. J. (1994). It's About Time: A Conceptual Framework for the Representation of Temporal Dynamics in Geographic Information Systems. *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 84, n° 3, p. 441-461.
- Pistre P., Commenges H., Guerrero D., Proulhac L. (2015). Operational Definitions of Time for Longitudinal Data Analysis: Illustration in the Field of Spatial Mobilities. *Nouvelles Perspectives en Sciences Sociales*, vol. 10, n° 2, p. 199-236.
- Rivard K., Cogswell D. (2004). Are you drowning in BI reports? Using analytical dashboards to cut through the clutter. *Information Management*, p. 26.
- Robette N. (2011). *Explorer et décrire les parcours de vie: les typologies de trajectoires*. CEPED.
- Saint-Marc C. (2017). *Formalization and geovisualization of historical natural risk events to understand spatial dynamics*. Theses, Université Grenoble-Alpes.
- Shi L., Jiang T., Zhao Y., Zhang X., Lu Y. (2017). UrbanFACET: Visually Profiling Cities from Mobile Device Recorded Movement Data of Millions of City Residents.
- Shi X., Yu Z., Chen J., Xu H., Lin F. (2017). The visual analysis of flow pattern for public bicycle system. *Journal of Visual Language and Computing*, p. 1-9.
- Thudt A., Baur D., Carpendale S. (2013). Visits : A Spatiotemporal Visualization of Location Histories. *EuroVis*, p. 2312.
- Tominski C., Schumann H., Andrienko G., Andrienko N. (2012). Stacking-based visualization of trajectory attribute data. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 18, n° 12, p. 2565-2574.
- Yan Y., Tao Y., Xu J., Ren S., Lin H. (2018). Visual analytics of bike-sharing data based on tensor factorization. *Journal of Visualization*, vol. 21, n° 3, p. 495-509.
- Zhao J., Forer P., Harvey A. S. (2008). Activities, ringmaps and geovisualization of large human movement fields. *Information Visualization*, p. 198-209.