

**État des lieux  
des  
REPRÉSENTATIONS DYNAMIQUES  
DES TEMPORALITÉS DES TERRITOIRES**

**Rapport Final  
Juin 2014**

**Lahouari KADDOURI**  
Maître de Conférences  
UMR 7300 Espace  
Université d'Avignon  
[lahouari.kaddouri@univ-avignon.fr](mailto:lahouari.kaddouri@univ-avignon.fr)

**Jean-Yves BLAISE**  
Chargé de Recherches - CNRS  
UMR 3495 MAP – GAMSAU, Marseille  
[jean-yves.blaise@map.archi.fr](mailto:jean-yves.blaise@map.archi.fr)

**Hélène MATHIAN**  
Ingénieure de Recherche – CNRS  
UMR 5600 Environnement Ville Société, Lyon  
[Helene.mathian@ens-lyon.fr](mailto:Helene.mathian@ens-lyon.fr)

**Paule-Annick DAVOINE**  
Maître de Conférences Grenoble-INP  
LIG – STEAMER, Grenoble  
[paule-annick.davoine@imag.fr](mailto:paule-annick.davoine@imag.fr)

**Cécile SAINT-MARC**  
Ingénieur d'Etudes  
LIG – STEAMER, Grenoble  
[Cecile.Saint-Marc@imag.fr](mailto:Cecile.Saint-Marc@imag.fr)

**Site de l'étude: <http://www.map.archi.fr/jyb/puca/>**



## Avant propos

Ce rapport présente les résultats de l'action « Représentations dynamiques des temporalités des territoires » engagée en 2012 par le PUCA, dans le cadre de son programme « Temporalités durables » dirigé par Pierre Bernard et Patrice Aubertel.

Ce programme a été initié en tant que piste de travail par le Conseil scientifique du PUCA. Son objectif est de dresser un état des lieux sur les questions traitées et la diversité des pratiques en ce qui concerne les représentations dynamiques afin d'identifier les questions qui restent posées par la recherche, et donc, qui mériteraient une exploration.

Durant une année, notre équipe, composée de 5 enseignant-chercheur-e-s, chercheur, et ingénieure s'est attelé à réaliser cet état des lieux.

Conformément aux attentes du PUCA et au cahier des charges que nous nous sommes fixés, ce **rapport** inclut à la fois des aspects historiques et une analyse de la production contemporaine sur les représentations des temporalités territoriales. On trouvera en annexe une **fiche d'analyse synthétique** de chacune des applications de notre corpus international de la production prises en compte dans l'analyse (**Annexe 1**).

Pour faciliter la recherche du lecteur, nous avons élaboré une **bibliographie** par catégories thématiques (les ouvrages collectifs et/ou généralistes, répertoires et ressources en ligne, ...) et par ordre alphabétique, qui comprend des liens de sites Internet des équipes de recherche investies dans la thématique, ceux des logiciels commerciaux, fournisseurs de services et d'applications téléchargeables, et ceux d'un ensemble d'applications cartographiques (**Annexe 2**).

Pour aller plus loin, nous proposons une **bibliographie structurée** selon 13 catégories décrivant les dimensions spatiales, temporelles et spatio-temporelles utilisées dans notre analyse de la production. Par exemple, on trouvera l'ensemble des références bibliographiques et des démonstrations en ligne portant sur les « transformations subies par un espace donné, qui en modifient la forme » dans la catégorie *Transformations* ; ou celles portant sur « le suivi des mouvements individuels à l'intérieur d'un espace donné » dans la catégorie *Mouvement* ; ou encore une distribution de celles portant sur quelques heures ou quelques jours, la granularité de la seconde à la journée ou l'échelle ou portée habituelle inférieure à 2 semaines dans la catégorie *Temps Immédiat*. Cette bibliographie est disponible sur le site dédié à cette étude <http://www.map.archi.fr/jyb/puca/>.

Un séminaire, organisé afin de diffuser les premiers résultats de notre analyse et de faire intervenir des spécialistes de la thématique, a été organisé le 5 février 2014 dans les locaux du PUCA au Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. Nous présentons ce **séminaire** en **Annexe 3** et renvoyons le lecteur vers le **site dédié** à notre étude pour visionner l'ensemble des diaporamas des experts intervenants.

Enfin, l'**Annexe 4** présente le fonctionnement d'un outil d'exploration du corpus de sites analysés disponible sur le site internet de l'étude (<http://www.map.archi.fr/jyb/puca/>). Un environnement de requête a été développé dans une perspective *infoviz* avec des visualisations dynamiques des analyses de la production, complémentaires à celles contenues dans ce rapport.

Enfin, je dédie l'ensemble de ce travail à Pierre Bernard initiateur de ce programme au PUCA, qui nous a quitté au cours de l'étude.

L. Kaddouri

## Table des matières

<b>Avant propos</b> .....	<b>3</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>7</b>
<b>1 Le contexte : une formalisation spatio-temporelle à l'épreuve d'une révolution technologique</b> .....	<b>9</b>
1.1-Information géographique et cartographie : une révolution technologique.....	9
1.2 Formaliser et représenter le changement et les temporalités : une question ancienne .....	10
<b>2- Les représentations du temps : legs méthodologiques</b> .....	<b>13</b>
2.1-Aperçu historique des représentations des temporalités .....	13
2.2 Représentations spatio-temporelles : legs méthodologiques .....	18
2.2.1 Le temps dans le phénomène à représenter : Le cas du mouvement.....	18
2.2.2 Le temps est extérieur à la représentation : la cas du changement .....	19
2.2.3 Le temps dans la sémiologie graphique : une réflexion ancienne .....	21
2.3 Interactions et apports des autres disciplines.....	25
<b>3-La visualisation dynamique des temporalités</b> .....	<b>28</b>
3.1- L'animation pour représenter le temps en cartographie .....	28
3.2- Animation vs Small maps .....	29
3.3- Sémiologie dynamique pour représenter le temps .....	31
3.4. De l'animation des cartes à la géovisualisation .....	32
3.5- Les outils de la géovisualisation.....	33
3.5.1 L'interactivité :.....	34
3.5.2 Le multimédia :.....	34
3.5.3 Le multifenêtrage et la synchronisation : .....	35
3.5.4. L'animation :.....	36
3.5.5. Des outils de géovisualisation à la diversité des usages .....	38
<b>4. Analyse de la diversité des productions</b> .....	<b>41</b>
4.1. Positionnement du corpus.....	41
4.2 Méthodologie d'analyse .....	44
4.2.1 Niveau de la conception : les dynamiques ciblées et les services rendus par la visualisation .....	44
4.2.2 niveau applicatif : processus, modes de représentation et d'exploration.....	47
4.2.3 Niveau factuel : grilles détaillées comparatives .....	50
4.3. Analyse de la diversité .....	53
<b>5. Réflexions sur les enseignements et perspectives</b> .....	<b>60</b>
5.1 Le paramètre temps, un grand absent.....	60
5.2 Des données massives, mais quelle qualité de données ? .....	61
5.3. Modalité de représentation : un enjeu interdisciplinaire .....	61
5.4. Intégrer la troisième dimension : des enjeux à explorer.....	62
5.5. « Geovisualanalytics » : un nouveau paradigme transdisciplinaire ?.....	62
5.6 Une meilleure diffusion scientifique de l'innovation.....	63
<b>6. Bibliographie</b> .....	<b>64</b>
<b>Tables des figures</b> .....	<b>68</b>
<b>Table des tableaux</b> .....	<b>70</b>

<b><i>Annexe 1. Fiches détaillées descriptives des applications .....</i></b>	<b><i>71</i></b>
<b><i>Annexe 2. Bibliographie structurée .....</i></b>	<b><i>123</i></b>
<b><i>Annexe 3. Séminaire (Programme et résumés) .....</i></b>	<b><i>151</i></b>
<b><i>Annexe 4. Trois outils d'analyse comparative visuelle du recueil de cas .....</i></b>	<b><i>157</i></b>



## Introduction

Depuis une vingtaine d'années, un certain nombre d'avancées technologiques (développement du web et développement des moyens d'acquisition) ont constitué le socle de changements d'usages de l'information en général : ces changements touchent tant les moyens d'acquisition, la diffusion des données, que la production d'environnements donnant à voir ces données, allant jusqu'à permettre la participation des utilisateurs à leur acquisition ou leur observation. Dans le domaine de la cartographie, ces changements ont marqué une véritable révolution dans les usages à différents niveaux :

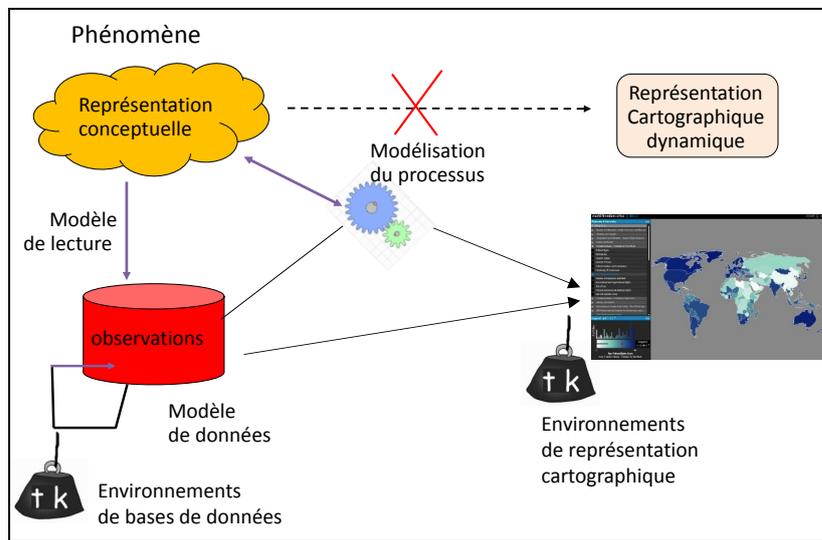
- l'innovation dans les échelles représentées (sous tendue en partie par des environnements tels que Google Earth et Google Maps) et la masse des nouvelles données et leurs temps d'acquisition (open data, données de tracking, ....)
- de nombreux développements cartographiques « dynamiques » et une démocratisation accrue de ces productions, allant de la simple carte « en ligne » permettant quelques interactions à l'utilisateur, à de véritables outils d'exploration se rapprochant des domaines du type *Visual Analytics*.

Ces changements ont tout d'abord profondément marqué le rapport auteur/utilisateur du message envoyé. On est passé d'une production spécialisée d'un auteur vers de multiples utilisateurs, à une production multiple, pouvant provenir des utilisateurs eux-mêmes. La carte est devenue interactive, multimédia, animée, dynamique. Elle est passée d'un support papier à un support électronique, et a été intégrée dans des applications informatiques de plus en plus complexes. L'utilisateur interagit avec elle dans un environnement où il peut définir lui-même ses priorités, ses objectifs. En quelques sortes, la conception de la carte et ses usages s'est ainsi démocratisée. Cette évolution a en particulier touché la représentation des temporalités : par les possibilités qu'elle offre pour « dérouler le temps », l'animation et l'interactivité ont permis un essor exceptionnel de ces représentations.

Il nous paraît essentiel de repositionner la représentation cartographique des temporalités au sein d'un processus de production de ces représentations. En effet comme l'illustre la Figure 1, la représentation du phénomène passe par un certain nombre d'étapes, confrontant la modélisation (données, processus) à des environnements technologiques (bases de données, environnement de cartographie interactive). A ces différentes étapes sont associés des enjeux qui concernent trois domaines :

- celui de l'information géographique, son acquisition et la modélisation des données,
- celui de la modélisation des processus,
- celui de la cartographie et de la sémiologie graphique.

Certaines articulation de cet enchainement sont soumises à des contraintes techniques (poids Tk sur le graphique) et il nous paraît important aussi de dissocier ce qui relève de développements méthodologiques et ce qui relève des aspects techniques.



- Figure 1. Du phénomène à sa représentation : un enchaînement d'étapes confrontant modèles et environnements technologiques

Ainsi ce rapport se positionne très clairement dans le cadre de ce schéma de réflexion où la donnée est au cœur du dispositif. Nous ne revenons pas ici sur les aspects épistémologiques qui peuvent être associées aux questions de représentation des territoires ainsi qu'à leur dynamique. Ce domaine relève à notre sens d'une réflexion en amont de la notre, qui pourrait venir enrichir les types de représentations cartographiques. Nous ne l'avons pas traité dans cette étude.

La suite du rapport sera donc centrée sur les représentations cartographiques dynamiques des temporalités des territoires. La première partie situe le contexte de recherche sur ces questions. Dans la deuxième partie nous présentons le paysage des legs méthodologiques, dont nous analyserons plus spécifiquement deux cas emblématiques. La troisième partie sera consacrée aux questions et solutions que la représentation des temporalités pose à la cartographie et la sémiologie graphique. Nous n'aborderons pas spécifiquement dans ce rapport les enjeux associés à la modélisation des processus, qui sont un domaine en soi, et n'apportent pas de plus-value à l'éclairage que nous proposons ici. Seule la question centrale de la modélisation du temps sera abordée car elle est directement liée à celle de sa représentation. Dans la quatrième partie nous présentons une analyse de la diversité des productions actuelles, qui s'appuie sur une grille de lecture fondée sur les catégories présentées dans la partie précédente.

# 1. Le contexte : une formalisation spatio-temporelle à l'épreuve d'une révolution technologique

## 1.1. Information géographique et cartographie : une révolution technologique

Qu'il s'agisse de phénomènes sociaux ou environnementaux, les années 1980 ont vu émerger une culture de la donnée en général, et géographique en particulier, qui s'est installée avec une culture de la « mise à jour » dans les années 1990, puis a été complétée au cours des années 2000 par une culture du « suivi ». Par ailleurs, on assiste aujourd'hui au développement de la production de données collaboratives et citoyennes contribuant à la massification des données. Cette culture de la donnée a touché l'ensemble des domaines utilisant l'information géographique, qui a connu un bouleversement considérable tant dans sa production, que dans ses caractéristiques et ses usages.

Le développement des systèmes d'observation, la performance des systèmes d'acquisition et l'accumulation des données au cours du temps permet de disposer d'une masse d'information géographique. Les dispositifs de localisation (GPS, téléphonie mobile) et le Géoweb constituent des outils de production d'information géographique à part entière. Avec le développement d'applications cartographiques collaboratives, telles que Open Street Map, WikiMapia... les citoyens deviennent producteurs de données géolocalisées. Ces données issues de la *Volunteered geographic information (VGI)* et du *crowdsourcing* tentent à devenir des données de référence (Goodchild, 2011).

L'information géographique est au cœur de notre société et de notre système économique. « On est passé de l'ère de la localisation de l'information à l'ère de l'information localisée. La maîtrise et la régulation de l'information géographique sont devenues un enjeu économique, politique et social de premier plan, où se confrontent et s'associent multinationales de l'Internet, fournisseurs d'accès, opérateurs téléphoniques, Etats... que les citoyens ne doivent pas ignorer » (Joliveau T., le Monde, 8 mai 2013). Ce contexte qui se caractérise par une accumulation des données géographiques, géolocalisées ou territoriales au cours du temps nous offrent de nouvelles opportunités en termes d'analyse des dynamiques spatiales ou territoriales. De plus en plus d'études portent sur l'analyse des mobilités des individus, sur l'évolution et sur l'expansion des villes, sur l'évolution des indicateurs socio-économiques ou environnementaux, sur les modifications des paysages ou des modalités d'occupation du sol, sur les dynamiques spatiales des phénomènes environnementaux (pollution, climat, végétation .....). Le temps devient une dimension intrinsèque de l'information, notamment avec les données en temps réel. Parallèlement, d'autres domaines, (histoire, archéologie, littérature, environnement,...) tentent de reconstruire la dimension géographique de l'information sur la base de documents anciens issus d'archives. Il s'agit d'associer la composante géographique à des jeux de données historiques (annuaires, recensement d'évènements ...) via des outils de géocadage (*gazeetters*), ou des méthodes de géoréférencement (cartes anciennes) ou d'extraction de contenus géographiques ou cartographiques.

Si pendant longtemps le temps a été le parent pauvre de la cartographie, aujourd'hui, compte tenu du volume et de la diversité des données disponibles, on est tenté de vouloir cartographier dynamiquement des évolutions, des changements, des mouvements, de mettre en relation les données afin d'en déduire les dynamiques des structures et des relations spatiales, ou tout simplement de donner à voir des objets ou des phénomènes spatio-temporels, des individus en mouvement. Or compte tenu de la variété des sources,

des modalités et des objectifs de production, l'information est devenue aujourd'hui multidimensionnelle et hétérogène, complexifiant sa représentation cartographique. Certes, l'évolution des technologies de l'information et de la communication a offert de nouvelles façons de publier et de représenter l'information géographique multidimensionnelle et depuis une vingtaine d'année, la cartographie a connu un renouveau. La carte est devenue essentiellement numérique, intégrée dans un environnement informatique plus ou moins complexe et performant. Elle est devenue un outil de communication privilégié et s'est largement démocratisée. L'introduction des techniques de l'interactivité et du multimédia a élargi les possibilités d'expressions cartographiques, facilitant la prise en compte de la dimension temporelle (date, durée, cycle ...), la diversité des échelles d'observation que ce soit sur le plan géographique (locale, globale, intermédiaire), temporel (période annuelle, mensuelle, journalière... et fréquence d'observation) ou dans la diversité des formats et des types de données (données structurées ou peu structurées).

Toutes ces évolutions ont aussi modifié les rapports entre l'auteur de la carte (celui qui émet l'information) et l'utilisateur (celui qui la reçoit) . En effet, la carte est reconnue comme un canal de communication par lequel son auteur transmet un message à un lecteur (Cauvin, 2008). Le processus d'élaboration des cartes statiques inscrit le lecteur (récepteur) dans un rôle passif, recevant une carte prête à l'emploi, alors que les environnements informatiques de cartographie tentent d'offrir au lecteur la possibilité d'interagir directement avec ce canal, le situant dans une boucle de rétroaction entre l'utilisateur et la carte. Selon la complexité des possibilités d'interactions, l'utilisateur peut être « récepteur (lecteur), émetteur (ajout de nouvelles information sur la carte), émetteur-recepteur (modification des traitements cartographiques) » (Antoni & al 2004). Notons toutefois que si ces nouveaux environnements ont contribué à démocratiser l'accès aux productions cartographiques et à leurs utilisations, augmentant le pouvoir des cartes, elles sont aussi le plus souvent le produit intuitif de spécialistes des NTIC plus que des cartographes (Kraak , 2006) (Cauvin & al., 2008) (Andrienko & al. 2008). Ils laissent parfois un degré de liberté particulièrement important dans le processus de construction cartographique, ce qui nécessite alors un code de lecture (Antoni & al, 2004).

Aujourd'hui, les géomaticiens s'investissent bien sûr dans ce nouveau champ et produisent des environnements ou des développements innovants en termes de représentations cartographiques. On a vu ainsi se développer des interfaces pour des représentations cartographiques permettant à l'utilisateur de zoomer, de se déplacer sur la carte, de décomposer l'information, d'animer ... puis par le couplage de ces interfaces avec des bases de données, ces cartes « actives » sont devenues « dynamiques » et ont permis aux utilisateurs de formuler leurs propres interrogations sur le territoire avec des accès directs à la base de données mise à jour. En France comme ailleurs, les spécialistes de la cartographie travaillent simultanément à développer des cadres conceptuels et à analyser cette production (Kraak, 2006) (Sillere, Robert 2007) (Kaddouri, 2008) (Cunty, Mathian, & al 2011) (Caron &al. 2005). Cette tendance s'est accrue ces dernières années et elle renvoie à des développements méthodologiques en particulier sur la formalisation des données. Les géomaticiens entretiennent cette réflexion depuis une vingtaine d'années.

## 1.2. Formaliser et représenter le changement et les temporalités : une question ancienne

La représentation des dynamiques spatiales contribue à leur analyse, en ce qu'elle permet d'étudier dans le temps, les transformations, modifications et évolutions des organisations

spatiales produites. Les dynamiques peuvent être des processus d'évolution ; des processus de diffusion ; des mouvements et déplacements, qui s'observent sur un temps long (plusieurs années ou période historique), ou sur un temps court (à l'échelle de la journée, du mois). Il est donc difficile de parler de temporalités des territoires sans parler d'échelle, de granularité. Chaque discipline a ses propres échelles de temps et d'espace et analyse les processus spatiaux et territoriaux au regard de ces échelles, qui définissent la granularité et les objectifs.

Par ailleurs, relativement aux étapes décrites dans la Figure 1 (modélisation des données, modélisation des processus, représentation) chaque discipline a ses propres spécificités. Ainsi les archéologues et historiens s'intéressent généralement à des dynamiques qui se situent sur la longue durée, et leur objectif consiste à « reconstruire » les dynamiques passées sur la base de données lacunaires et hétérogènes. A l'inverse, le temps des urbanistes et aménageurs est très contemporain et l'objectif est d'observer des tendances pour « construire » un futur (Lepetit, Pumain, 1993). On retrouve la même diversité d'approches, du point de vue des échelles géographiques mobilisées, selon le domaine, allant de l'échelle du bâtiment ou de la parcelle, à des échelles relatives aux espaces de mobilités de proximité ou de mobilité quotidienne, ou encore d'un bassin versant de rivière ou de fleuves, des systèmes régionaux... Ainsi le passé des uns se situe dans le présent des autres, le niveau géographique « méso » des uns correspond au niveau « micro » des autres. Par ailleurs les dynamiques observées résultent généralement d'une combinaison de processus aux rythmes et durées différents.

Représenter des dynamiques nécessite une phase de formalisation. La représentation d'un phénomène tel qu'« il se déroule dans le temps » résulte de choix qui sont faits en amont pour représenter les données associées à ce phénomène (Figure 1). Cette phase inclut la définition des entités élémentaires qu'elles soient spatiales ou temporelles. Ces entités définissent les granularités auxquelles le phénomène sera analysé et les temporalités représentées. Ces différents aspects seront particulièrement développés dans la partie exposant notre analyse (§4).

La formalisation des processus et de ces composantes a fait l'objet de nombreux développements dans le domaine de la géomatique, particulièrement entre 1990 et 2000. Les solutions proposées s'inspirent de développements provenant de l'informatique pour raisonner sur la formalisation du temps et du changement, dans un but le plus souvent opérationnel d'enregistrement de l'information (Peuquet 1994, Worboys 1994, Cheylan & al., 1995, Claramunt & Thériault 1995, Mennis & al. 2000, Yuan 2001). L'ensemble de ces travaux conviennent que la question de la représentation de données spatio-temporelles, (représentation informatique, puis cartographique) nécessite de décomposer l'information selon trois dimensions : le temps, l'espace et la dimension thématique du phénomène lui-même. Ces travaux et formalismes ont tout d'abord porté sur la dualité de la formalisation de l'espace, soit continue (field-based), soit discrète (object-based). De même le temps est formalisé en termes de changement (change-based) ou en termes d'événements (event-based). Dès le début des années 90, Couclelis (1992) avait déjà noté cette analogie espace /temps dans la dualité des points de vues qui permettait de mettre en regard certaines composantes de l'espace et du temps : points et instants, champ continu et durée, objets spatiaux et événements. Les dynamiques sont représentées au regard de ces choix, et chacun de ces choix constitue bien un point de vue sur un phénomène spatio-temporel (par exemple une inondation peut être considérée comme un événement sans durée et localisé en un point ou comme un processus ayant une durée et une inscription spatiale qui évolue).

Il a déjà été noté que ces formalismes ont marqué les différents développements de cartographies animées (Cunty & al 2011), et que ces différentes appréhensions de l'espace et du temps (discret/continu) constituent sans doute le premier facteur de différenciation entre les développements contemporains. En particulier, on retrouve sur les outils de représentation du temps et de l'espace ces représentations continue ou discrète de l'espace et du temps. Le recours à des approches en termes d'ontologie a largement enrichi ces développements par la suite et pourraient avoir une résonance pour les représentations cartographiques. Le principal reproche qui est fait à ces formalismes est de considérer le changement via les deux dimensions (espace et temps) prises comme deux dimensions indépendantes. Il est soutenu que la représentation des dynamiques géographiques nécessite plus que l'introduction du temps via la notion de changement. Cette vision est appelée 3D+1 (3D pour l'espace et 1 pour le temps). Pour raisonner en termes de processus, apparaît le besoin de réfléchir sur la formalisation d'objets 4D, appelés par Galton « hyperobjets » (Yuan 2001, Renolen 2000, Galton 2004, Worboys 2005).

Ces derniers formalismes permettraient aussi sans doute de réconcilier géographes et historiens, ou du moins de définir des approches qui produisent des représentations « dominées par l'espace » (« space-dominant ») et celles qui sont « dominées par le temps » (« time-dominant »). Dans le premier cas les entités observées sont spatiales et on observe comment le temps les fait évoluer. Dans le second, l'approche « temps-dominant », sans doute plus proche des temporalités elles-mêmes, considère des entités temporelles et représente leur inscription spatiale. C'est le cas par exemple du formalisme proposé par Rodier et Saligny (2010) qui construit des objets historiques sur la base de composantes spatiale et thématique, mais aussi temporelle. Une approche en termes d'hyperobjet permettrait une vision unifiée des processus spatio-temporels.

En effet représenter les temporalités conduit à représenter les différentes caractéristiques de l'action du temps sur un phénomène, dans sa dimension spatiale et thématique : quantité, qualité, rythme, périodes... Cette acception est sans doute celle qui est la plus consensuelle. Elle donne lieu dans le cadre des nouveaux développements, à la formalisation d'un temps linéaire, qui est exploité comme un simple mécanisme de remplacement d'un état de l'espace par un autre. Alors même que les formalismes ont dépassé cette vue « photographique » de l'évolution, c'est sans doute notamment dans le franchissement de cette limite que les technologies et méthodologies contemporaines doivent être questionnées pour aider à explorer les temporalités d'un phénomène – vitesse, rythmes, densités, cycles, etc.

Le fait de formaliser en amont les différentes composantes des processus à analyser, permet de constituer une grille de lecture générique. Les éléments qui sont présentés ci-dessus permettent de comparer des mises en œuvre qu'il s'agisse de questions à l'échelle du globe – mesurer et comprendre l'impact du réchauffement climatique au cours du temps, par exemple – ou de questions à l'échelle d'un territoire plus restreint – évolution du trafic automobile sur une route départementale dans l'année ou année après année par exemple. Ainsi, la problématique de la représentation des temporalités doit, tout en se nourrissant de la diversité de ces approches, s'abstraire de ces différences d'échelles pour se concentrer sur les choix et les composantes qui en résultent. C'est aussi la démarche qui sera adoptée pour comparer les différents environnements de représentation de ces temporalités, en abordant ces questions de manière générique.

Tous ces formalismes se sont nourris évidemment de différentes expériences que nous proposons d'illustrer dans une deuxième partie.

## 2. Les représentations du temps : legs méthodologiques

Les représentations du temps et de l'espace sont anciennes. Il est intéressant d'en montrer un éclairage synthétique, d'une part pour en identifier les procédés et méthodes et d'autre part pour introduire des catégories parmi ces méthodes. Par ailleurs nous verrons que parmi ces procédés, certains ont survécu à l'épreuve du temps, et d'autres non, alors qu'ils sont d'une grande efficacité.

Ces questions de représentation du temps et des temporalités sont loin d'être neuves : si les solutions informatiques nous apportent aujourd'hui de la capacité de calcul, des interactions, de la multimodalité, du temps réel, de l'externalisation ouverte... Avant elles, bien des solutions visuelles, souvent très ingénieuses ont été développées pour raisonner conjointement sur l'espace et le temps, et parfois de façon beaucoup plus efficace et économe.

Il nous paraît donc indispensable de faire ce tour rapide de legs méthodologiques afin de mettre en évidence les rapports existants ou ayant existé entre la cartographie stricto sensu – entrée souvent privilégiée pour analyser une dynamique spatiale – et le champ de la visualisation d'informations, où la formalisation de la dimension temporelle et le recours à l'abstraction apportent un contrepoint utile. Nous proposons donc de commencer par un inventaire visuel des legs, sur lesquels on pourra ensuite se baser pour réfléchir à la représentation combinée du temps et de l'espace.

Nous proposons dans un premier temps un jeu de repères chronologiques croisés, illustratif des différentes démarches, sans avoir l'ambition d'être exhaustif ni représentatif. Puis nous présenterons quelques cas emblématiques de représentations spatio-temporelles, pour introduire ensuite la manière dont cette question a été traitée dans d'autres disciplines. L'ensemble de ces legs constitue les fondements des explorations cartographiques actuelles qui seront présentées dans le §4.

### 2.1. Aperçu historique des représentations des temporalités

Nous proposons de décliner cet aperçu historique au regard de trois grandes familles de pratiques qui se sont penchées sur ces questions de représentation spatio-temporelle et ont donné lieu à un corpus de représentations originales et spécifiques à chacune des approches : la **chronographie**, la **cartographie**, et la **statistique**. Nous avons synthétisé dans la Figure 2 leurs propres objets d'étude, face à la décomposition classique de la question selon les trois composantes: l'espace, le temps et le phénomène.

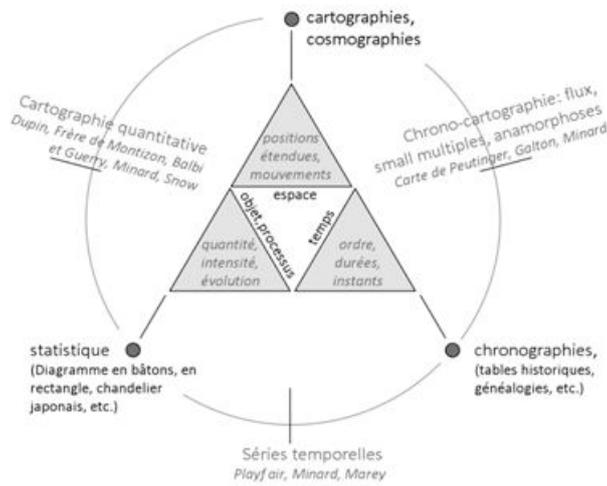


Figure 2. La représentation dynamique de temporalités : des legs méthodologiques à mobiliser

Donner un aperçu des legs méthodologiques de façon exhaustive serait évidemment hors de propos dans le cadre de ce rapport, mais il nous semble utile de mettre face à face quelques repères essentiels relevant de ces trois familles. Cette confrontation permet de mettre en évidence 3 périodes. Les Figure 3, Figure 4 Figure 5 illustrent cette confrontation en mettant en vis-à-vis quelques grandes avancées en matière de **cartographie** (partie gauche) et quelques travaux pionniers en matière de **représentation de données et de données orientées temps** (partie droite). Les exemples et illustrations proposés sont extraits des travaux de M. Friendly, E.R. Tufte, J. Lefort, G. Palsky, G. Schuller, R. Spence, J.P. Saint-Aubin, D. Rosenberg et A. Grafton.

La première phase (Figure 3) illustre une expression souvent symbolique, des graphiques utilisateur-centrés (pour le voyageur, pour le croyant, pour l'administrateur, etc...) et des couches d'informations hétérogènes portées conjointement.

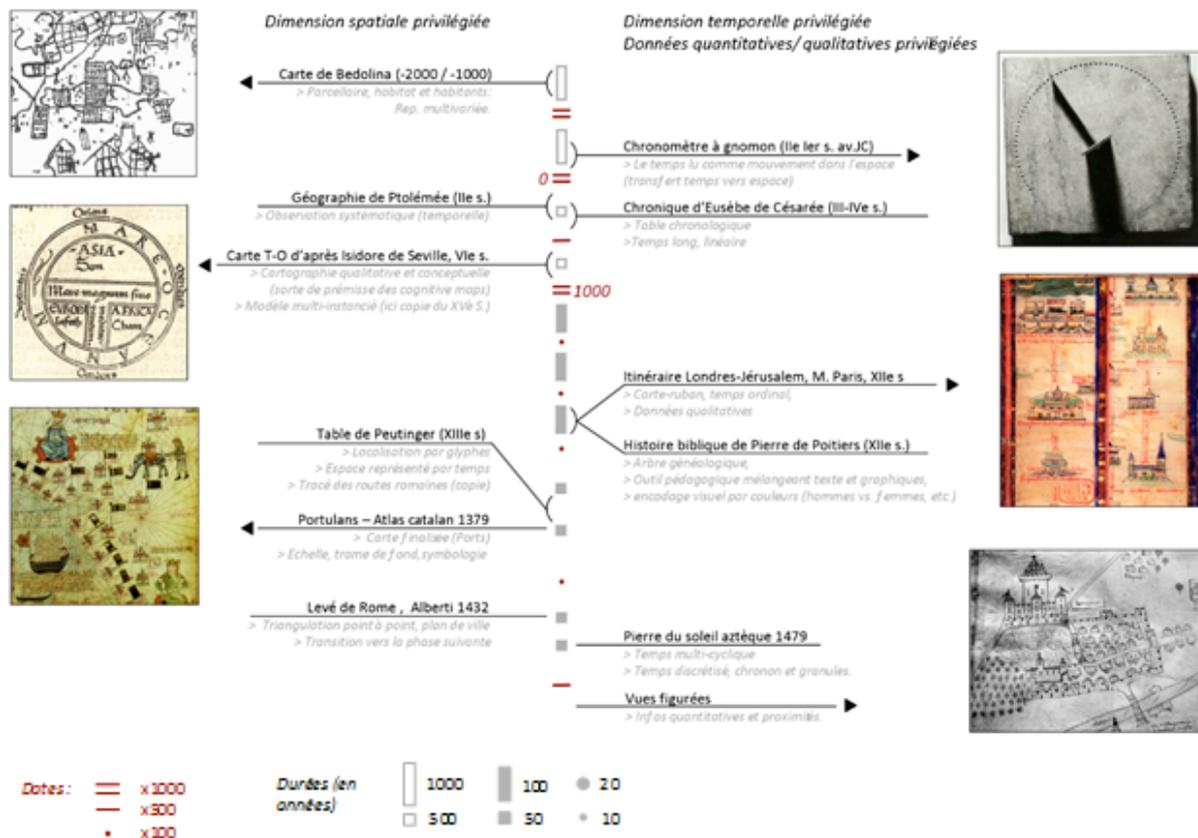


Figure 3. Confrontation des représentations « orientées espace » et « orientées-temps et données » (période avant 1500)

A partir de 1500 la symbolique laisse la place à la rationalité et l'exactitude (Figure 4). Les solutions visuelles entre les deux approches (cartographie et visualisation des données) tendent à diverger (tableau poléométriques par exemple) - prémisses du graphique comme outil de raisonnement. L'abstraction symbolique est remplacée par une abstraction mathématique (tableau poléométrique). La mesure affecte fortement les représentations, qu'elles soient cartographiques ou non. Et les représentations orientées temps et données sont fortement inspirées des représentations cartographiques.

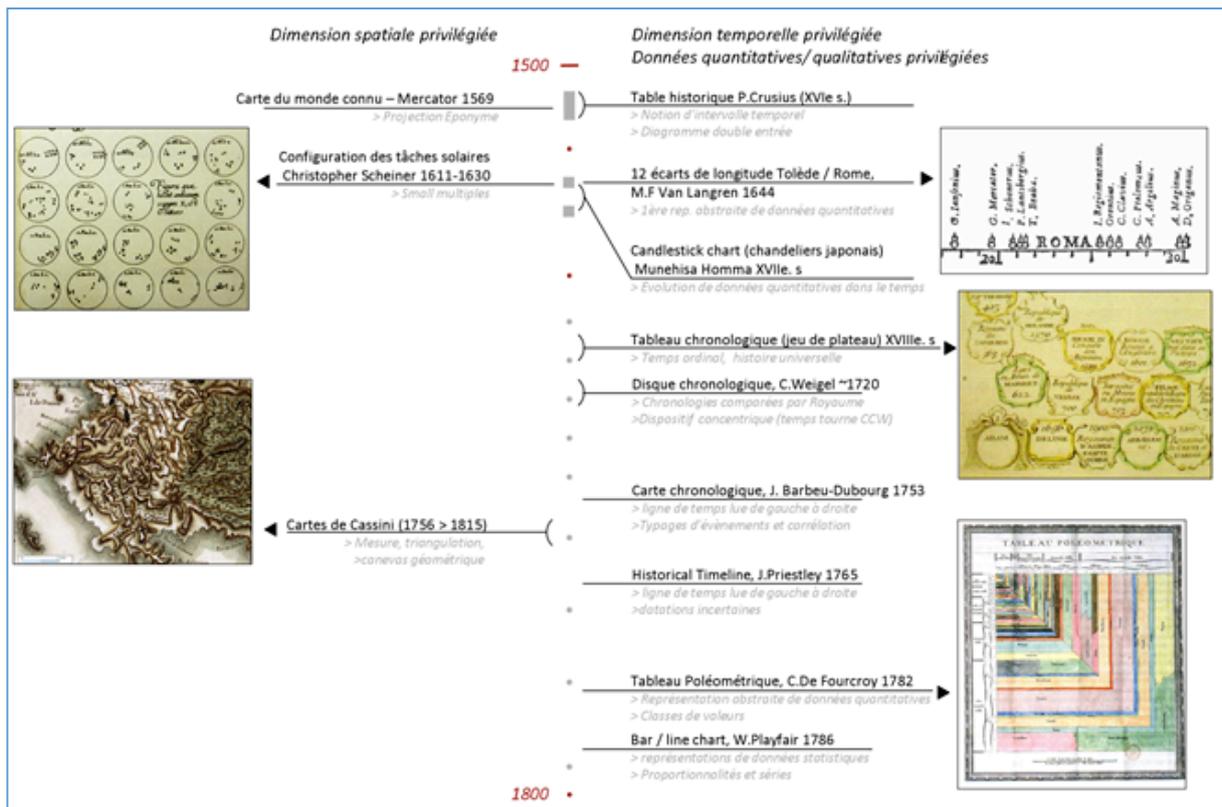


Figure 4. Confrontation des représentations « orientées espace » et « orientées-temps » (période 1500-1800)

La troisième période est marquée par l'apparition de solutions « spécialisées » produites par réductions finalisées (échelle catholique, horaire de train...) (Figure 5). En parallèle, les dimensions spatiales et temporelles et/ou thématiques sont combinées dans des solutions visuelles d'aide au raisonnement et à la corrélation (Minard, Marey, Galton, etc). Certaines de ces solutions restent sans égal en termes de simplicité et efficacité, nous reviendrons dessus dans les paragraphes suivants.

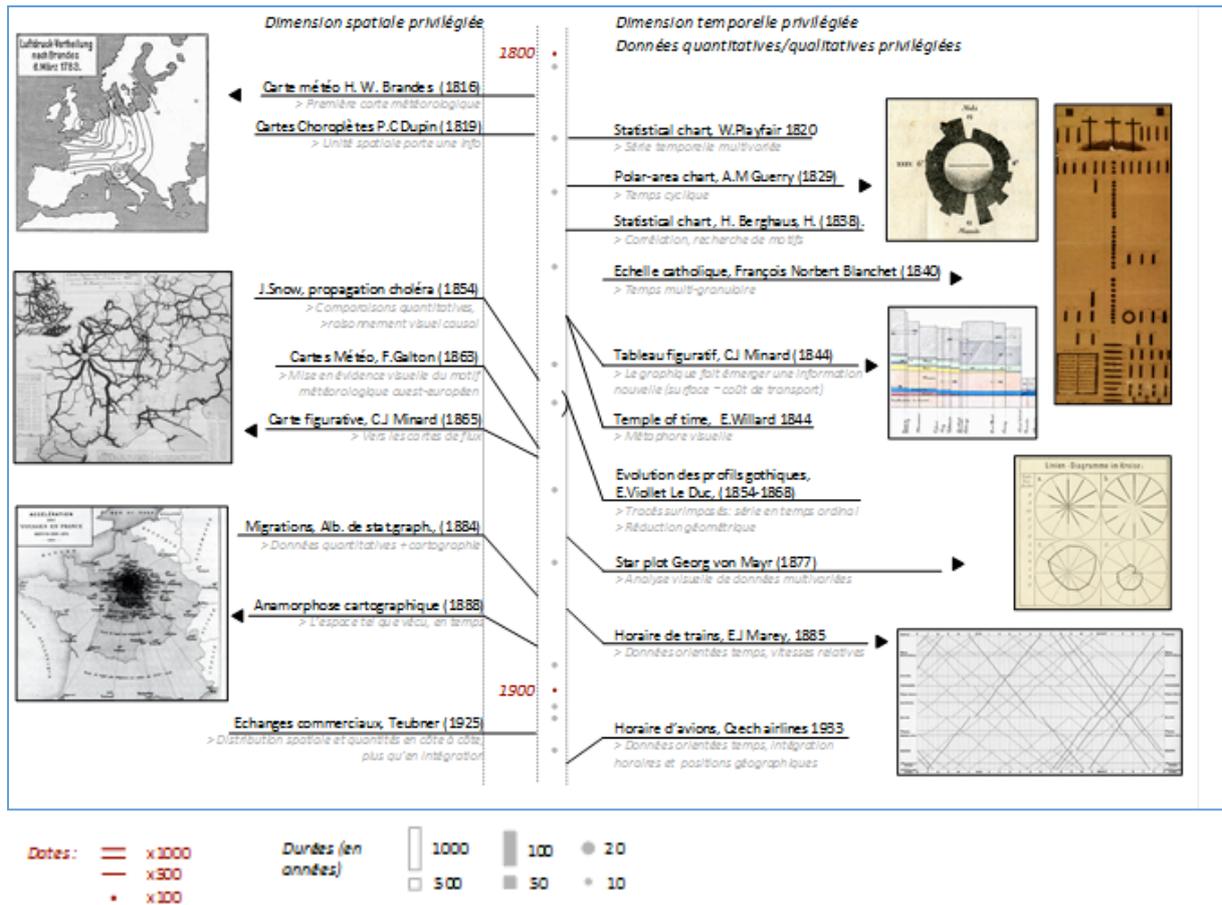


Figure 5. Confrontation des représentations « orientées espace » et « orientées-temps » (période après 1800)

Cette confrontation, aussi incomplète soit-elle, souligne plusieurs points importants :

- Le développement continu de pratiques, non seulement en cartographie mais aussi en chronographie et en visualisation de données.
- La coexistence d'une logique de spécialité, et d'une logique de passerelle ou de combinaisons entre dimensions. Dans la première, pour chaque dimension, émergent des avancées propres, alors que dans la seconde logique c'est de la combinaison que résulte l'avancée.
- Un nombre de passerelles (ou de développements combinés) relativement limité, mais une grande diversité des modes de combinaison

En ce sens, cette confrontation vient d'abord à l'appui du constat général fait dans le cadre de ce rapport : l'existence de barrières ayant entravé ou entravant la mise en œuvre de solutions visuelles combinant les trois dimensions susmentionnées. Mais elle souligne aussi l'existence de passerelles multifformes, comme autant de pistes à développer ou à re-développer pour mieux équilibrer représentations de spécialités et représentations combinées.

## 2.2. Représentations spatio-temporelles : legs méthodologiques

Cet historique rapide montre la richesse et l'originalité des productions intégrant espace et temps. Nous proposons dans cette partie d'insister plus précisément sur les moyens mis en œuvre. Nous commençons par revenir sur deux cas emblématiques permettant d'introduire une différenciation classique lorsque l'on parle de représentations spatio-temporelles : on traite généralement de façon différente du mouvement, où le temps est intrinsèque, et des processus de changement, où le temps agit sur l'espace. Les questions de sémiologie graphique et leurs rôles dans la représentation des phénomènes spatio-temporels seront ensuite introduites. Nous finirons sur les interactions entre différentes disciplines et le positionnement disciplinaire actuel de ces questions sur les représentations des phénomènes spatio-temporels.

### 2.2.1. Le temps dans le phénomène à représenter : Le cas du mouvement

Lorsque les interactions espace - temps sont patentes, et rendent lisible un phénomène *spatio-temporel*, alors le potentiel de la carte de flux se révèle. C'est évidemment le cas de la représentation cartographique de la *retraite de Russie* de Charles Joseph Minard (Figure 6), décrite dans *La méthode graphique dans les sciences expérimentales* (1878) par E.J. Marey en des termes qui en disent long sur l'admiration qu'il avait pour cette réalisation : « *nulle part la marche des armées n'atteint ce degré de brutale éloquence qui semble défier la plume de l'historien* ». La *retraite de Russie*, décrit il y a quelques années par E.R Tufte comme « *le meilleur graphique jamais conçu* » stupéfie non seulement par des choix de langage visuel particulièrement adroits (nombre limité de variables graphiques, corrélation entre mouvements, quantités et températures, choix pertinent des couleurs, inversion de celles-ci entre aller et retour, tri dans les données contextuelles de température, affichées seulement pour le retour, etc. ) mais par les interactions autorisées entre trois dimensions :

- un espace, qui semble interminable, réduit pourtant à quelques rivières, et à un trajet ;
- un temps ordinal qui fait de chaque observation, de chaque mesure, une étape d'un destin funeste ;
- des données quantitatives corrélées (pertes de soldats, températures) qui font de cette visualisation ce que Marey en dit : un récit éloquent, i.e. *qui parle*.

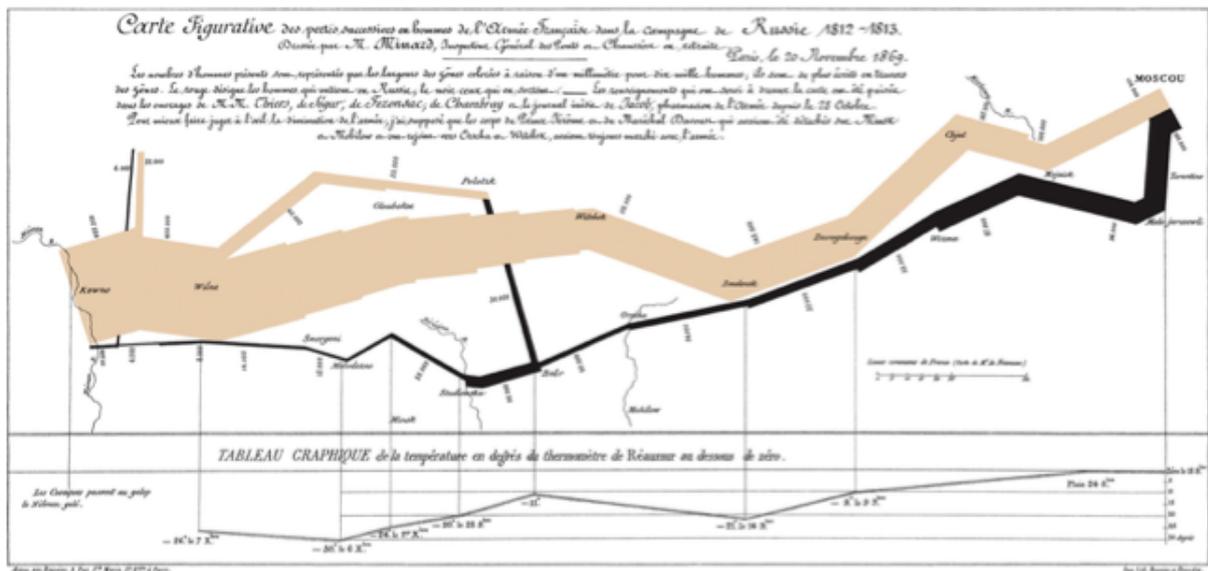


Figure 6. La carte de Minard : une carte emblématique support de réflexion méthodologique pour la représentation du temps

Charles Joseph Minard est aujourd'hui respecté, admiré, non seulement au-delà des frontières de la France mais largement au-delà des frontières de sa discipline d'origine, comme en témoignent les deux exemples ci-dessous. Un premier enseignement à tirer, même s'il sera discuté, est que son héritage, comme celui d'E.J Marey ; mérite d'être beaucoup mieux valorisé dans son propre pays.

Mais au-delà de cette première remarque il convient de tirer quelques enseignements fondamentaux sur ce que peut être la représentation graphique d'un flux (au sens, mouvement d'une quantité dans l'espace) :

- un travail de réduction d'abord : Minard représente non pas une armée, avec ses canons et ses chevaux, mais des soldats ;
- un travail de corrélation finalisé ensuite : Minard cible la variable température, et pas la beauté du paysage, le nombre de champs brûlés ou la couleur des toits des églises orthodoxes

En ce sens, Minard donne aux mots de Jacques Bertin – [graphique] comme réponse à une question – tout son sens, et invite aujourd'hui à repenser la façon dont un mouvement est observé, quelquefois en l'absence de toute contextualisation le rendant intelligible ou au moins analysable.

Il nous faut préciser que cette carte emblématique est devenue une source d'inspiration à de nombreux développements informatique (Menno-Jan Kraak, 2001 <http://www.itc.nl/personal/kraak/1812/3dnap.swf>; Aaron Walburg, Stephen Hartzog, 1996, <http://www.math.yorku.ca/SCS/Gallery/minard/march-animated.gif>).

### 2.2.2. Le temps est extérieur à la représentation : la cas du changement

La « Géographie » de Ptolémée illustre une méthode d'observation de l'espace qui fait du temps un outil indispensable : chaque observation est placée dans une série, et c'est de la série que naît l'enseignement, la compréhension du phénomène étudié. Mais la représentation finale ne fait pas toujours voir cette série, ne l'exploite pas comme telle.

Au contraire, la série d'observations des tâches solaires produite dans le premier quart du XVIème siècle par Christoph Scheiner, jésuite allemand, astronome et mathématicien, se traduit par une série de représentations fixant des instantanés, et présentés côte à côte. Scheiner invente ainsi un format visuel qu'E.R Tufte appellera bien plus tard *small multiples*, encore présent (seul ou combiné avec une approche type animation) dans bien des dispositifs contemporains et dans bien des disciplines, sous la forme d'images instantanées (Figure 7).

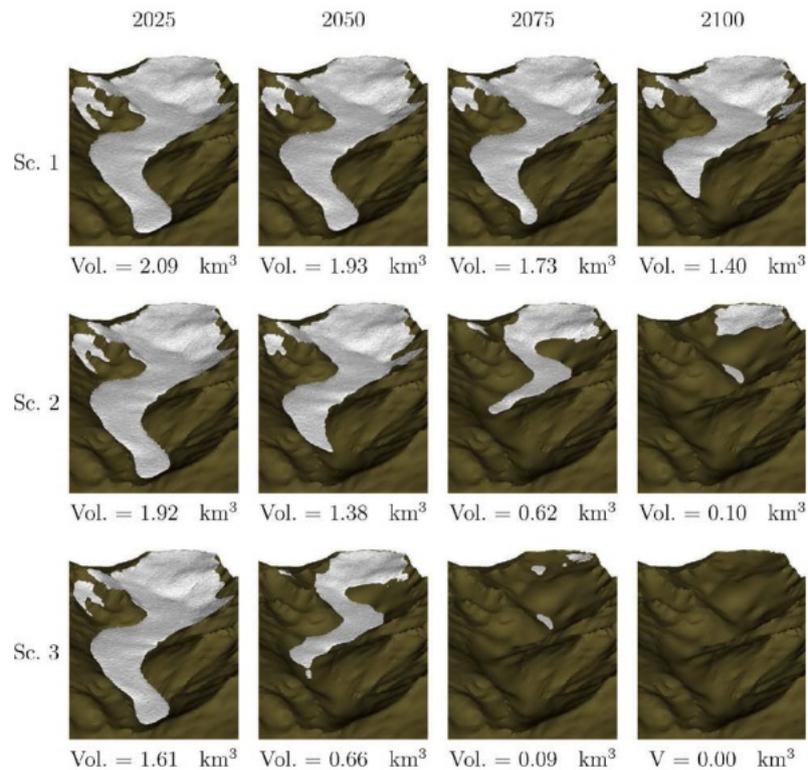


Figure 7. Une application du format visuel « small multiples » dans le contexte d'une évaluation visuelle comparative de différents scénarii d'évolutions en glaciologie (G.Jouvet et al., Numerical simulation of Rhonegletscher from 1874 to 2100, J. Comput. Phys. (2009).).

Le format s'appuie en réalité sur deux principes très simples : la répétition et le temps ordinal. Il inaugure une pratique, la fouille visuelle de données, qui est aujourd'hui au cœur des disciplines *Infovis* ou *Visual analytics* en général. Plaçant côte à côte des « états » successifs de l'espace, il met l'accent sur des changements : que ce soit par effet de proximité (différences entre deux états contigus dans la représentation) ou sur l'ensemble des états présentés, des instants capturés (lecture des tendances, contrastes entre régions au sein de la représentation). En ce sens on ne peut pas parler ici d'analyse du mouvement, mais bien d'états successifs dont le pas de temps peut en soi être une variable sur laquelle l'utilisateur va jouer. Naturellement, le dispositif est gourmand en espace de représentation. Chaque état, représenté par une « unité graphique », ne peut donc porter qu'un nombre limité d'informations. Un tel dispositif ne va donc pas sans un effort de réduction du problème, i.e un effort de modélisation et de paramétrisation du phénomène. Si ni la carte des tâches solaires de Scheiner (Figure 4, §2.1), ni l'exemple présenté ci-dessus (Figure 7) ne sont de pures abstractions, détachées de tout contexte cartographique. Mais le format visuel inauguré par Scheiner impose bien un effort de réduction et d'abstraction particulier. C'est aussi dans ce sens que travaille F. Galton qui analyse les motifs météorologiques européens dans son *Meteorologica* en observant un jeu limité de paramètres, trois fois par

jour (Figure 8) : pression barométrique, température, direction des vents, pluie. Son analyse est traduite graphiquement par une série en temps discret, multi-granulaire, représentant un mois d'observations. Galton se sert du format visuel *small multiples* (ou collection de cartes) pour corrélérer les différents paramètres et pour mettre en évidence le rapport entre pression et direction des vents (CCW en phase de basses pressions, CW en phase de hautes pressions). Chaque unité graphique porte une sorte de fond cartographique, mais un fond qui en réalité ne sert que de référent de positionnement commun sur lequel sont portés les paramètres susmentionnés.

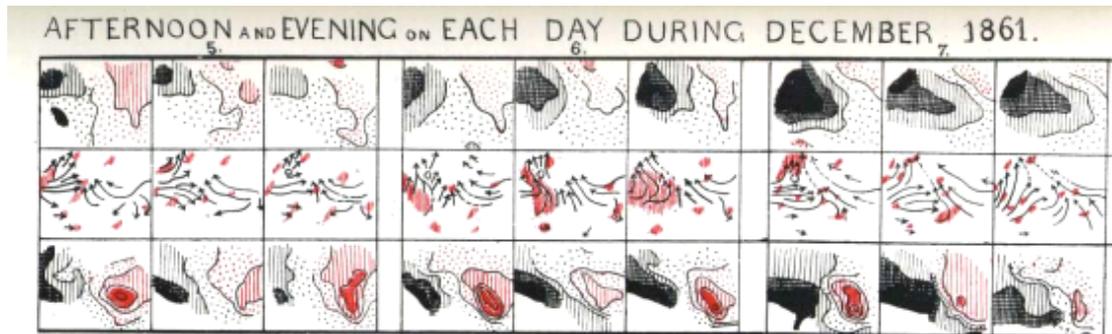


Figure 8. Trois unités graphiques du dispositif de F. Galton, représentant trois jours d'observations. Chaque unité graphique est ici redécoupée verticalement (observations le matin, à midi, le soir) et horizontalement (pression, vent et pluies, température).

### 2.2.3. Le temps dans la sémiologie graphique : une réflexion ancienne

La construction cartographique s'appuie sur les variables visuelles définies par Bertin (1967) et qui constituent la sémiologie graphique, i.e. « l'ensemble des règles d'un système graphique permettant de transmettre une information ». Les règles sont définies en fonction de la nature de la variable à cartographier (quantitative ou qualitative), et des objets géographiques supports (points, lignes ou polygones) (Figure 9). L'objectif est de faciliter la lecture et la compréhension des cartes en faisant apparaître des relations d'association, de ressemblance ou de différenciation, d'ordre, de proportionnalité entre les données géographiques (Bertin, 1967).

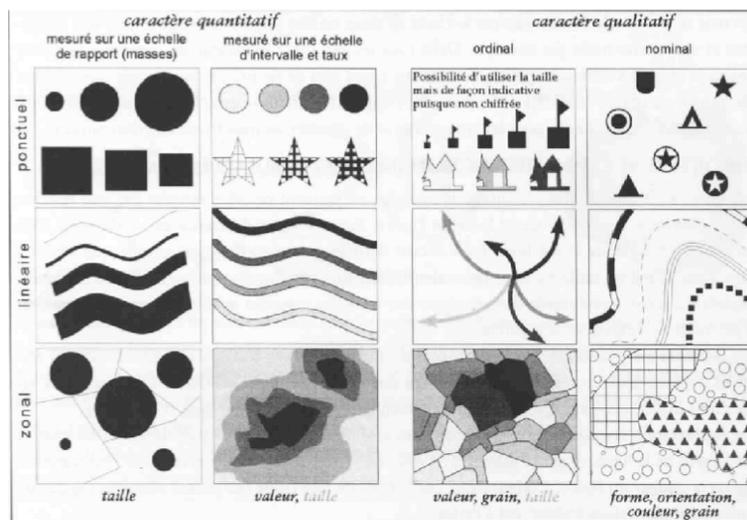


Figure 9. Sémiologie graphique et variables visuelles proposées par Bertin (1967)

La sémiologie graphique proposée par Bertin (1967) s'inscrit dans une cartographie statique dans laquelle le temps est considéré comme une variable cartographique (durée, taux de changement) ou comme une composante projetée, se traduisant par une collection de cartes (Small maps). En s'appuyant sur ces règles, une façon classique de cartographier les dynamiques temporelles et notamment les évolutions, consiste à représenter les taux de variations des indicateurs d'une même entité géographique entre deux dates (variations d'indices ou de taux ...) ou de construire la carte du changement d'état du phénomène étudié. Bertin (1967) préconisait aussi de cartographier le mouvement par des cartes de flux sur lesquelles sont portées des flèches, ou le changement de position d'un objet ou d'un individu par la représentation de sa « trace », i.e. la succession des positions et des empreintes spatiales de l'objet, au moyen de la variable visuelle « valeur » dont le niveau de saturation varie en fonction du temps (Figure 10). L'usage de la transparence et de la saturation peut venir compléter cette proposition dans le cas de superposition des traces. Toutefois, cette approche présente des limites de lecture lorsque le nombre d'éléments devient important (Davoine & al, 2012).

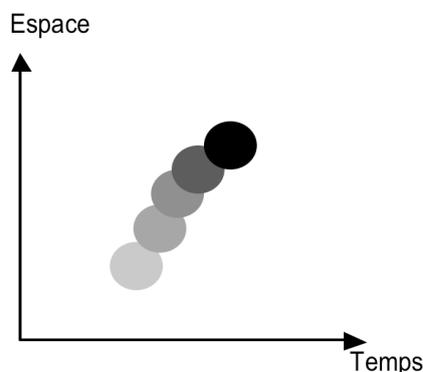


Figure 10. Représentation de la trace d'un objet selon Bertin (1967)

Vasilev, (cité par Cauvin, 2008) fait évoluer la sémiologie en tenant compte des différentes catégories du temps et de la géométrie de l'objet (Figure 11). Les catégories de temps considérées sont le moment et la durée entre deux événements, le temps structurant tel que

la fréquence, ou le temps comme distance. Il s'appuie notamment sur l'inscription dans la carte de la date d'occurrence de l'objet, pour représenter le moment, et à partir de laquelle peuvent être déduites différentes temporalités. Ce procédé implique un niveau de lecture détaillé et non pas global comme le suggère Bertin, ce qui peut rendre plus délicate l'identification des structures spatiales, des dynamiques ou des variations spatio-temporelles.

Catégorie	Dimensions géométriques		
	Point	Ligne	Surface
<b>Moment</b> Dates des événements	● juin 2007 Ouverture de la gare TGV Champagne-Ardennes	juin 2007 Mise en service de la ligne TGV Est	avril 2006 Crues du Danube
<b>Durée</b> Continuité des événements	● Gare non desservie du 25 au 29 décembre 2006 9h45 ● stations du tram ligne A, avec 9h55 ● heures de passage 10h05 ●	Trajet du tram (arrêts et liaisons) 9h45 ● 9h55 ● 10h05 ●	surface d'un parking : occupation du jeudi au samedi jeudi ● vendredi ● samedi ●
<b>Temps structurant</b> Fréquence Temps standard	Jours d'ouverture d'un hypermarché ● lundi ● mardi ● mercredi Fuseau horaire central UTC	fréquences de lignes ferroviaires — une fois par jour — deux fois par jour — toutes les heures	
<b>Temps comme distance</b> Intervalle de temps Direction et/ou distance temporelles	Position temporelle des lieux à partir de la place centrale 15 min 10 min 5 min Hypermarché ● Gare ● Halles ● Zone d'activités ●	Distance-temps en voiture Place centrale ● 12 mn 15 mn Gare ●	Espace géographique de référence Espace fonctionnel des transports ferroviaires
<b>Espace comme horloge</b>	Est : lever du soleil Ouest : coucher du soleil		Fuseaux horaires

C. Cauvin, O. Klein, 2008, d'après I. Vasiliev, 1996

Figure 11. Sémiologie graphique pour la représentation du temps dans les cartes selon Vasiliev (Cauvin & al 2008)

Si les règles de la sémiologie s'appuient sur des fondements méthodologiques reconnus, leur application dans un contexte de cartes statiques 2D reste complexe voire ambiguë. Par exemple, la cartographie de la chronologie d'une série d'évènements (par exemple de risques naturels) ne présentera pas les mêmes caractéristiques selon que la date est considérée comme une variable qualitative (c'est-à-dire une variable discrète, caractérisant l'objet en lui-même), sur laquelle la variable visuelle couleur sera appliquée, ou comme une variable quantitative ou qualitative ordonnée, pour laquelle sera appliquée la variable visuelle valeur (variation de teinte ou saturation) dont l'objectif est de mettre en évidence une relation d'ordre.

Pour faire face à cette complexité, une solution consiste à considérer le temps comme une troisième dimension et à utiliser une représentation sous la forme d'un cube spatio-temporel. Cette proposition, qui s'inscrit dans le courant de la Time-Geography d'Hägerstrand (1970), a été initialement utilisée pour traiter des problématiques de déplacements et de mobilité. Elle s'attache à représenter les trajectoires des individus dans l'espace, sur un plan horizontal et dans le temps sur l'axe vertical. Les variables thématiques associées aux trajectoires (modes de déplacement, activités ...) sont placées à l'intérieur du cube selon leurs projections sur les axes temporel et spatiaux, et leurs caractéristiques formalisées au moyen de la sémiologie graphique (Figure 12).

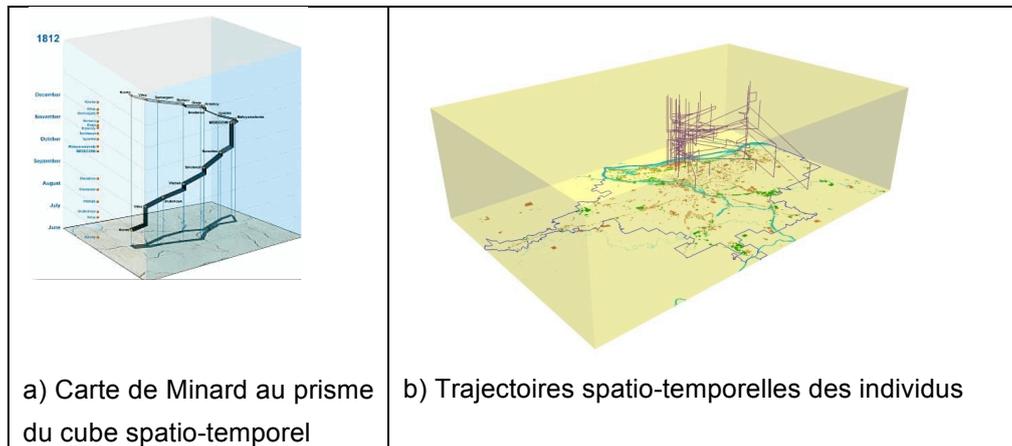


Figure 12 . Le temps à travers le cube spatio-temporel  
a) d'après Kraak (2003); b) d'après Kuan (2004)

Cette approche a ouvert de nouvelles opportunités pour la représentation des dynamiques spatio-temporelles, même si l'interprétation nécessite un code de lecture et que son usage reste réservé à des spécialistes. Andrienko & al (2003), Gatalsky & al (2004) proposent une adaptation du cube spatio-temporel à des problématiques basées sur des données d'évènements organisées sous la forme de série chronologique de données spatialisées (Figure 13). Relevant plus de la visualisation scientifique que de la cartographie, elle montre aussi la nécessité d'inscrire la représentation des temporalités et des dynamiques territoriales dans une démarche pluridisciplinaire.

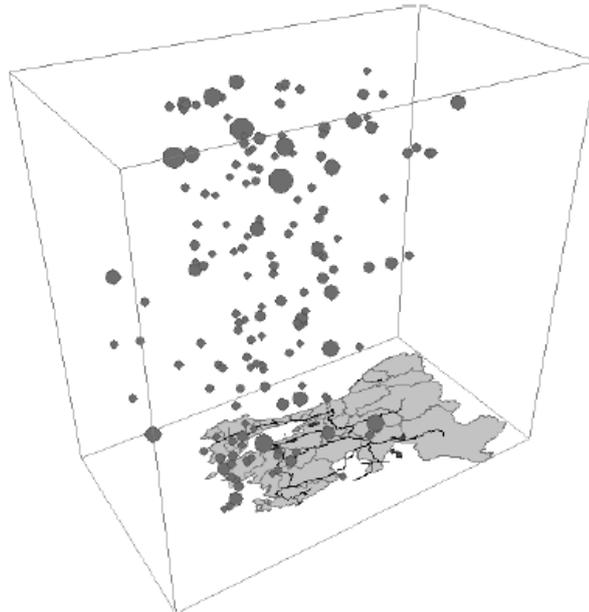


Figure 13. Cube spatio-temporel pour la représentation des évènements : la position verticale représente la date à laquelle s'est produit l'évènement, la taille des cercles représente un attribut thématique tel que l'intensité du séisme (d'après Gatalsky & al, 2004).

### 2.3. Interactions et apports des autres disciplines

Compte tenu de la difficulté à représenter les interactions Espaces – Temps, il peut être fructueux, pour comprendre comment s'analysent des temporalités, de prendre appui sur d'autres disciplines ou pratiques, et notamment sur les travaux issus du champ de la visualisation d'informations, et de son excroissance « visual analytics ». En effet, des solutions existent pour représenter des temporalités non uniformes par de l'espace. L'un des exemples les plus spectaculaires est sans doute *l'horaire de train* d'E.J Marey, qui au même titre que la *retraite de Russie* de Minard ou la *sémiologie graphique* de Bertin ont eu un grand retentissement dans le champ de la visualisation d'informations. Marey transforme dans ce graphique une information temporelle (durées, vitesses) en espace. Le graphique se lit de la façon suivante (Figure 14) :

- verticalement, les gares (et distances) entre Paris et Lyon
- horizontalement, les heures (24)
- obliquement, les trains, de Paris vers Lyon (oblique vers la droite et vers le bas) et de Lyon vers Paris (oblique vers la droite, de bas en haut).
- Chaque train est décrit par une heure de départ depuis Paris ou Lyon, par une heure d'arrivée, et par une série d'escales dont la durée est lue horizontalement.

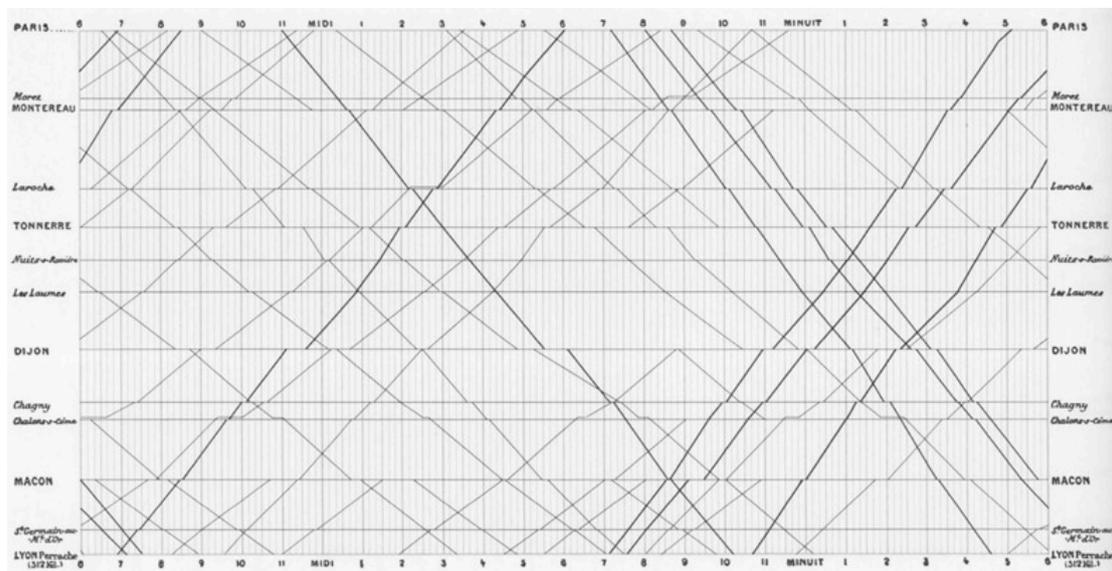


Figure 14. L'horaire de train d'E.J Marey (1885) source : E.R Tufte (1990)

Le dispositif graphique ainsi constitué permet en conséquence de lire la vitesse de chaque train, représenté par l'angle que fait l'oblique avec l'horizontale (plus l'oblique se rapproche de la verticale, plus les heures de départ et d'arrivée sont proches, donc plus le train est rapide).

Marey tente ici un nouvel équilibre entre espace et temps et illustre ce qu'E.R Tufte appellera plus tard le règle du « 1+1 = 3 » : en plaçant distance et temps sur son graphique, il permet la lecture d'une troisième variable, la vitesse. En réalité son graphique, d'apparence finalement assez simple – des lignes en tout et pour tout, sans couleurs - synthétise un nombre très important d'informations, comme par exemple :

- durées des escales pour chaque train ;
- nombre d'escales pour chaque train ;
- nombre de gares sur la ligne ;
- influence du nombre d'escales sur la durée totale ;
- densités des départs et arrivées sur 24 heures.

Ces propositions facilitent les comparaisons, les analyses, les observations comme par exemple :

- vitesses des trains de nuit par rapport aux trains de jour ;
- non-relation entre nombres d'escales et différences de vitesses (Le train partant à 11h de Paris ne s'arrête que 5 fois, il est pourtant plus lent que le train partant de Paris à 19h10 et qui s'arrête 6 fois) ;
- les trains les plus rapides, dans les deux sens, partent exactement à la même heure.

L'idée que l'on peut représenter une notion comme la vitesse par de l'espace, et une variable graphique ad hoc, n'est pas restée sans suite – même si l'expérience de Marey reste probablement inégalée en terme de rapport nombre de variables graphiques / nombre d'informations représentées.

Par ailleurs, et relevant du même pont interdisciplinaire, l'analyse de dynamiques spatiales mobilise aujourd'hui des masses de données que l'on ne peut plus représenter au travers de cartographies classiques, donnant naissance à un champ émergent – *geovisualanalytics* –

potentiellement porteur de réponses originales. La communauté *Infovis* s'est constituée en croisant cette exigence là et la capacité à traiter des données massives et abstraites qu'apportaient les solutions informatiques. Son répertoire de moyens inclut, selon W. Kienreich (2006), trois volets + 1 : formalismes, métaphores, modèles + dispositifs d'intégration permettant de les combiner. Dans ce cadre, la cartographie joue potentiellement à la fois le rôle de modèle et celui de dispositif d'intégration (Blaise, 2005). Par ailleurs, à des échelles spatiales ou temporelles différentes, bien d'autres champs disciplinaires ou pratiques intègrent des problématiques de prise en compte du temps : urbanisme, archéologie, sciences de l'environnement, santé / surveillance médicale, analyse musicale, etc.

Les thématiques de la représentation des dynamiques spatiales, des données orientées temps, ou plus largement de la géovisualisation, restent aujourd'hui au cœur de nombreux travaux en visual analytics (Scharl, Tochtermann, 2007 ; Keim et al., 2010 ; Elmqvist et al., 2010). Mais parce que la spatialisation des informations à analyser n'est pas le point d'entrée unique ou privilégié d'un dispositif de visualisation d'informations, à la carte (interface interactive et dynamique évidemment, puisque c'est un aspect implicite en *infovis*) peuvent se substituer des dispositifs mettant en exergue d'autres facettes des jeux d'informations (qualité/densité des informations ou aspects temporels par exemple) (Blaise, 2008) correspondant mieux au caractère souvent hétérogène des informations manipulées. Il faut ensuite préciser qu'en *infovis* aussi, la visualisation de données spatio-temporelles se traduit bien souvent par des visualisations qui expriment d'un côté les informations spatiales et de l'autre les informations temporelles. Mais il existe aujourd'hui des solutions combinant temps et espace (au sens cartographique) (Kapler, Wright, 2004 ; Blaise, 2011 ; Sabol, 2008) qui peuvent être investiguées dans le contexte d'une représentation dynamique des temporalités des territoires.

Le recours à différentes approches a donc pour intérêt de mettre en regard différentes formalisations du temps. Par exemple, dans le champ de la géomatique et de la modélisation dynamique, les données spatio-temporelles vont être abordées différemment selon qu'il s'agit d'un géographe dont l'objet d'étude est l'espace ou d'un archéologue ou d'un chercheur en sciences de la terre et de l'environnement, qui privilégiera la dimension temporelle (Rodier, Saligny, 2010), ou encore dans le champ méthodologique *Infovis*, où la dimension temporelle prédomine sur la dimension spatiale (Aigner et al., 2008 ; Keim et al., 2010).

### 3. La visualisation dynamique des temporalités

Comme nous l'avons évoqué précédemment, les récentes avancées technologiques ont offert de nouvelles possibilités de représentations cartographiques des temporalités notamment à travers l'émergence de la cartographie animée et dynamique et des environnements de géovisualisation. Mais traiter la question de la visualisation nécessite de définir sans ambiguïté un terme largement galvaudé, le terme *visualisation*. Faire de la visualisation, ça n'est pas faire un dessin, fût-il interactif, animé, 3D, pour communiquer le résultat d'un processus cognitif qui aurait été mené à bien. C'est assister par le graphique ce processus cognitif. Une visualisation n'est donc pas un but, mais un moyen, c'est une activité cognitive (Spence, 2001) utilisant la vision pour raisonner (Schneiderman et al, 1999).

#### 3.1. L'animation pour représenter le temps en cartographie

L'animation apparaît comme l'une des solutions les plus récentes pour représenter les mouvements, les changements ou les transformations dans l'espace en fonction du temps (Antoni & al, 2004). Ce procédé consiste à afficher de façon successive et rapide une série de cartes représentant le phénomène à différent instant, donnant ainsi l'illusion d'un mouvement, d'un déplacement ou d'un changement (Cauvin 2008), et l'impression d'une dynamique de l'espace. Kraak et al. (2003) soulignent également ce fait : « les animations sont très utiles pour clarifier des tendances et des processus, aussi bien dans l'explication que pour donner un aperçu des relations spatiales ». La mise en œuvre des cartes animées repose sur différents procédés permettant de représenter un changement sur place (la position), en place (les attributs) ou dans le temps (Kraak 2001).

- L'animation de série chronologique ou « animation par image » qui permet de lire les phénomènes spatiaux dans un temps à séquence temporelle. Le temps se découpe selon des « pas de temps », définis suivant différentes granularités temporelles. Le temps de l'animation (qui utilise les pas de temps de représentation) est proportionnel au temps réel (pas de temps dans la réalité) et peut représenter différentes granularités temporelles (heures, jours, mois, années, siècles...). La série chronologique témoigne du changement de localisation ou d'autres attributs de données spatialisées dans le temps ;
- le clignotement et le déplacement d'objets, aussi nommé « animation par objet » : des symboles clignotent, ce qui attire l'attention du lecteur (Fisher, in Kraak et al, 1995). L'effet est similaire avec une simulation de trajectoire d'un objet (Moellering's, in Kraak et al, 1995). Dans ce cas, les évolutions sont perçues grâce aux changements des modifications graphiques, elles-mêmes observées par le lecteur.
- déplacement sur carte : ce type d'animation inclut les glissements de vue (aussi nommé « survol » de la carte) et le zoom (Dorling's, in Kraak et al, 1995). Le zoom est particulièrement intéressant pour se situer à plusieurs échelles simultanément (passage du global au local). Concernant le survol, les travaux de l'Hostis montrent que la troisième dimension peut être encore plus appréciée si elle est animée (animation 3D), et qui plus est en survol, permettant de saisir rapidement le relief et d'effectuer des rotations autour de ce dernier. Les travaux de Banos et alii (2005), Banos et alii (2005), Segura (2003), Frihida et alii (2003) et Thevenin (2002) utilisent les cartes animées en ajoutant la troisième dimension qui représente un attribut autre

que l'altitude, et son survol. Par exemple en représentant les rythmes de personnes dans une agglomération, la carte animée se déforme en 3D selon l'attribut « concentration/déconcentration » (Figure 15). Ce type de carte se nomme « carte chronotopique » (Guez, in Thevenin, 2002). Cette carte animée révèle alors des « configurations spatio-temporelles similaires » au moyen de fonctions qui permettent de sélectionner une distribution temporelle de référence pour un espace étudié (Thevenin, 2002).

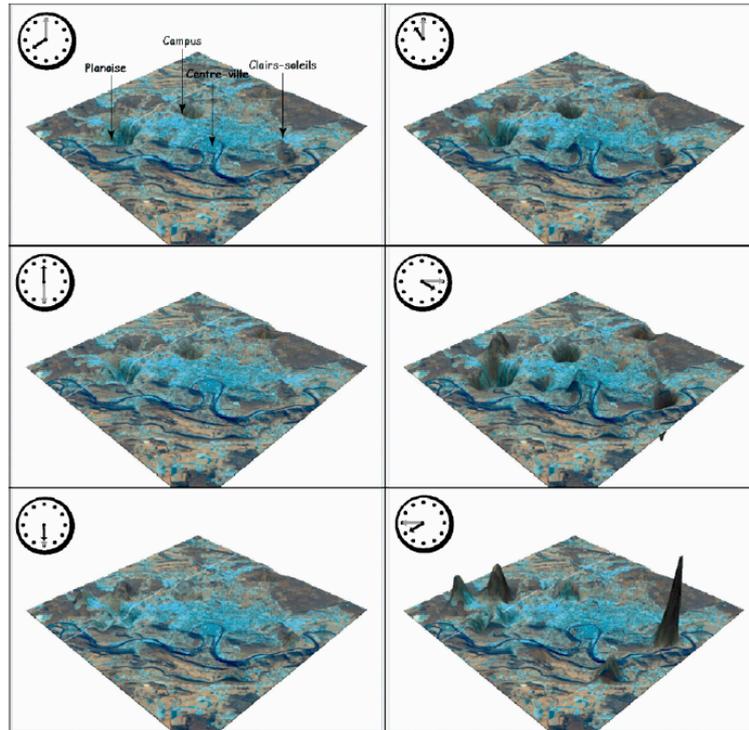


Figure 15. Carte animée 3D pour révéler les temporalités (Banos & al, 2005)

### 3.2. Animation vs Small maps

Une animation est donc une sorte de « snapshots », de dispositif « small multiples » amélioré, où le pas de temps séparant chaque observation, chaque état, peut être traduit (au facteur d'échelle près) par la vitesse de défilement de l'animation. Il est important de noter que ce transfert direct temps - temps n'est pas sans conséquence en terme de lisibilité. Si le « mouvement » d'un état au suivant est sans doute mieux perçu dans une animation que dans un dispositif small multiples, la comparaison directe d'un état non seulement avec le suivant mais avec tout autre état de la série est en revanche beaucoup plus problématique. Autrement dit, il faut sans doute considérer ces deux solutions non pas comme concurrentes, s'excluant l'une l'autre, mais bien comme complémentaire – et rares sont aujourd'hui les plateformes qui assument ce double choix et l'implémentent concrètement.

Cette position est confirmée dans une étude comparative récente menée par une équipe de l'Université de Lausanne (Boyandin & al. 2012) qui tentent de comparer les performances de ces deux solutions autour de données migratoires (Figure 16). Dans cette étude, les auteurs distribuent à un public de testeurs une série de tâches d'analyse concrètes à mener autour des données illustrées ci-dessus, et mesurent les performances obtenues avec les deux solutions. Leur travail démontre notamment qu'utiliser une seule technique peut conduire à moins de « découvertes » dans les données. Si les « retours utilisateur » indiquent que ceux-ci favorisent les animations, les mesures de performance ne vont pas dans ce sens. Le mapping temps - temps (animation) est particulièrement efficace pour souligner et localiser

des rythmes, des densités de changements, mais peu efficace pour comparer des états distants dans le temps.

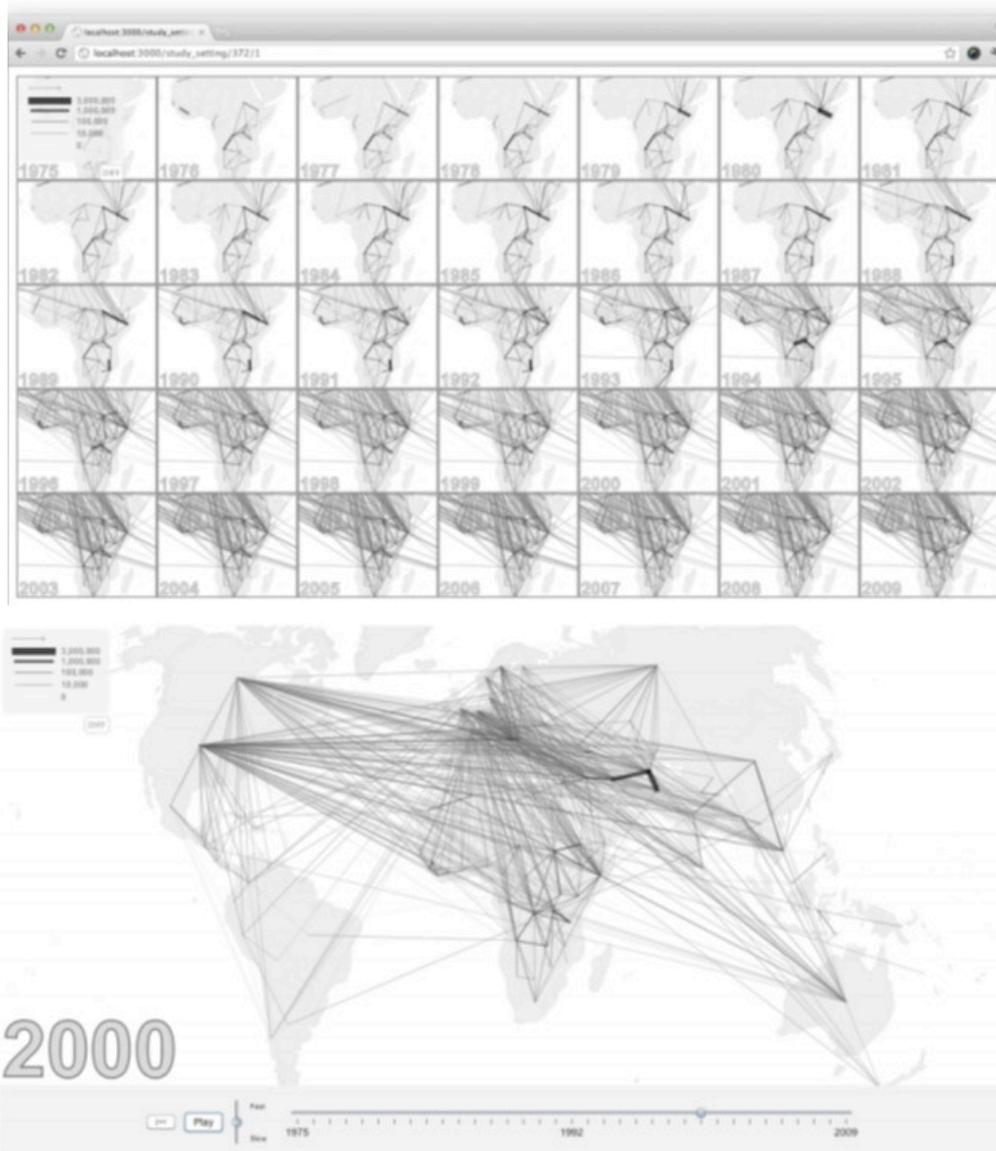


Figure 16. Données mises en œuvre dans Boyandin, Bertini, Lalanne (2012) - analyse de flux migratoires appuyée (bas) sur une animation et (haut) sur une série type « small multiples ».

### 3.3. Sémiologie dynamique pour représenter le temps

L'émergence de l'animation en cartographie a eu pour conséquence de reconsidérer la sémiologie graphique et les variables visuelles, notamment pour représenter les temporalités. Selon *DiBiase (1992) et MacEachren (1994)* à chaque temporalité peut être associée une variable dynamique, telles que le moment, la durée, la fréquence, le taux de changement, l'ordre et la synchronisation. Plusieurs auteurs ont analysé l'adaptation des variables visuelles de Bertin dans un contexte de cartographie dynamique (Kobben et al 1995 ; Dukaczewski 2006). Ils montrent que la synchronisation, la période de retour, ainsi que l'espace temporel ne sont pas considérés et que la fréquence est peu valorisée par les variables visuelles classiques (Tableau 1).

Temporalités Variables cartographiques	Moment	Durée	Fréquence	Chronologie	Changement
Taille		+++	++	++	+++
Valeur		+++	++	++	+++
Grain / Trame	+++	+++	++	++	+++
Couleur	+		(+)	(+)	
Orientation	+++		++	++	
Forme	+++		++	++	

+++ Très adapté ++ Adapté + Peu adapté

Tableau 1. Pertinence des variables visuelles dans des cartes dynamiques (d'après Kobben et al 1995 ; Dukaczewski 2006)

Ce constat justifie la définition de variables visuelles adaptées au contexte de l'animation proposées par DiBiase (1992) et MacEachren (1994), et dont l'utilisation peut se décliner selon les modalités suivantes (Figure 17).

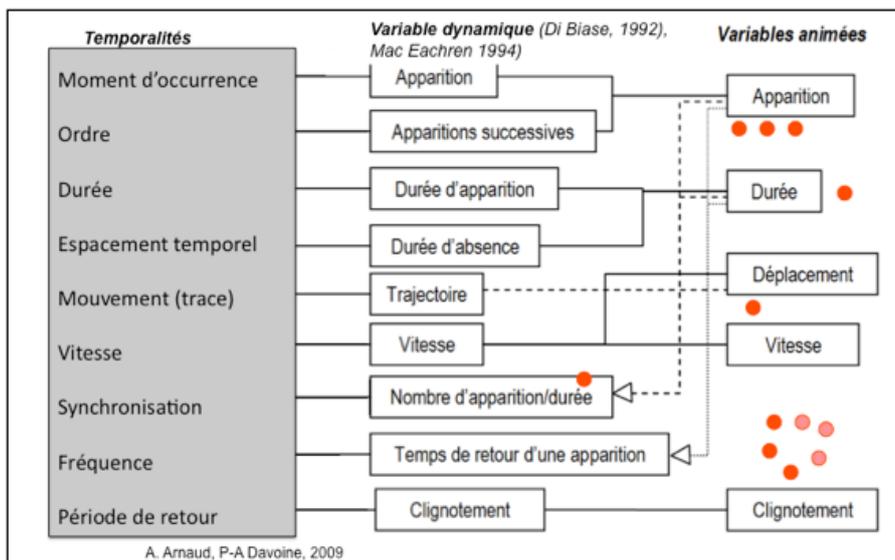


Figure 17. Variables animées et représentation des temporalités (d'après Arnaud & al, 2009)

- L'apparition permet de rendre compte du moment d'occurrence en visualisant l'affichage des événements. Cette variable permet également de représenter l'ordre en visualisant une apparition successive d'événements, la fréquence par un nombre d'apparitions ou de durées, et la période de retour par un temps entre deux objets.
- La durée d'affichage d'un événement pour cartographier sa durée.
- Le déplacement qui permet de représenter un objet qui se déplace dans le temps. Cette variable peut être associée à la vitesse d'un objet.
- La vitesse, qui permet de visualiser le taux de changement.
- Le clignotement pour, éventuellement, mettre en évidence la synchronisation des événements.

Si ces variables visuelles ont permis de formaliser le processus de représentation des cartes animées, ouvrant de nouvelles opportunités pour la prise en compte de la dimension temporelle, il n'en reste pas moins que l'animation et donc l'usage des variables animées ne peut être dissociée du principe de l'interactivité « utilisateur-interface ». L'animation ne peut être efficace que si l'utilisateur peut interagir avec elle, choisir son rythme de déroulement, revenir sur ce qui l'intéresse. Ceci n'est possible que si elle s'insère dans un environnement de visualisation disposant d'un minimum d'interactivité et offrant au lecteur des fonctionnalités de lecture et d'interrogation.

### 3.4. De l'animation des cartes à la géovisualisation

L'interactivité se définit comme un processus d'échanges entre deux acteurs. D'un point de vue informatique, elle se traduit par un ensemble d'outils (clavier, souris, pointeur ...) et de fonctionnalités, accessibles à travers une interface, permettant à un utilisateur de communiquer avec un système informatisé. Dans un contexte cartographique, c'est la carte qui devient alors un élément primordial de l'interface : si elle est bien conçue, elle permet l'accès aux données et aux informations, d'en produire de nouvelles et alimente ainsi les connaissances des utilisateurs. Mais l'interactivité est aussi un des sens qui est donné à l'adjectif « dynamique » lorsque l'on parle « d'application de cartographie dynamique ». Les actions de l'utilisateur sur la carte et notamment lorsque celle-ci est animée, rendent « les cartes dynamiques ». Par ailleurs, dans certaines applications informatiques de cartographie, c'est aussi le lien avec la base de données qui est caractérisé de dynamique : les cartes sont produites dynamiquement, « à la demande » en fonction des données sélectionnées et des besoins des utilisateurs.

L'évolution des techniques de l'information et de la communication, associée au développement des méthodes et outils de l'interactivité, ont contribué au déploiement d'une diversité d'environnements dynamiques appliqués à la cartographie et aux données spatialisées. Celles-ci se définissent comme des d'applications de géovisualisation qui peuvent être plus ou moins complexes, allant de simples applications cartographiques de données géographiques, basées uniquement sur l'animation et l'interactivité, à des environnements de développement d'interfaces multidimensionnelles associant plusieurs formes de représentations visuelles de l'information (graphiques, cartographiques, textuelles, iconographiques), et offrant un fort niveau d'interactivité.

La géovisualisation offre de nouvelles opportunités pour représenter les temporalités des territoires. Elle s'appuie sur l'utilisation de nouvelles formes cartographiques telles que les cartes interactives, multimédias et animées, ainsi que sur l'association au sein d'une même interface de visualisation de différents médias et modes de représentations graphiques et

cartographiques des données. La logique de raisonnement qui sous-tend la démarche de géovisualisation reflète l'association des composantes temporelle, spatiale et informationnelle qui caractérisent les dynamiques territoriales. Peuquet (1994) formalise ces associations selon trois questions « What ? Where ? When ? » qui se décline de la façon suivante (Figure 18) :

- Quoi ? + Où ? → Quand ? : décrit le moment (Quand) où un objet (Quoi) se situe à un endroit donné (Où).
- Quoi ? + Quand ? → Où ? : décrit la localisation (Où) d'un objet (Quoi) à un moment donné (Quand).
- Où ? + Quand ? → Quoi ? : décrit ce qui est présent (Quoi) à un endroit donné pour un moment donné

Du point de vue de la visualisation des données, aux deux premières déclinaisons (Quoi ? + Où ? et Quoi ? + Quand ?) sont naturellement associés des cartes (Où ?) et des graphiques (Quand ?) (Kraak, 2003). L'association espace-temps se traduit par l'association graphiques/cartes mais aussi par le cube spatio-temporel (Figure 18).

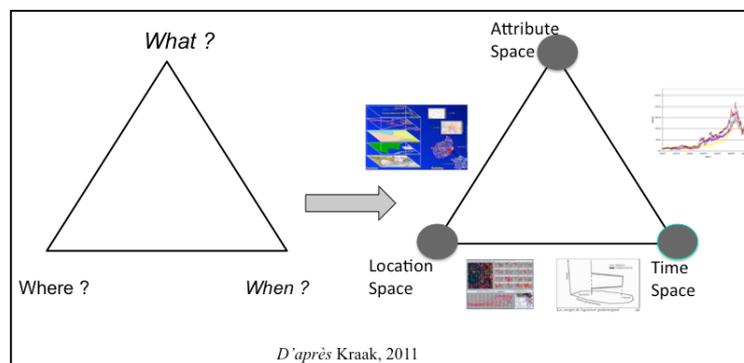


Figure 18. De la Triade de Peuquet à la géovisualisation (d'après Kraak, 2011).

Les interfaces de géovisualisation présentent l'avantage de mobiliser et de permettre d'explorer une masse importante de données selon différents critères, différentes entrées thématiques et différentes approches exploratoires. Elles offrent la possibilité de contextualiser les données en accédant à de l'information complémentaire sur les données représentées (au moyen des info-bulles par exemple) ou en facilitant la comparaison de séries de données ou d'indicateurs (affichage simultané de plusieurs séries de données sous différentes formes graphiques). Certaines d'entre elles utilisent le principe de la ré-expression cartographique qui consiste à redéfinir l'expression graphique de la carte (modification du mode de visualisation des données, mais aussi du contenu), en fonction des besoins et des motivations de l'utilisateur et offrent un service de production cartographique « à la demande ».

Au moyen d'une diversité d'outils de géovisualisation, l'utilisateur peut alors pousser l'analyse et l'exploration des cartes et des données, construire une démarche de lecture cartographique allant du global au particulier, lui offrant ainsi la possibilité de voir le connu mais aussi de rechercher l'inconnu, qu'il s'agisse de l'espace ou du temps.

### 3.5. Les outils de la géovisualisation

L'interactivité, l'animation, le multimédia, le multi-fenêtrage, la synchronisation constituent donc les principaux outils sur lesquels reposent les applications de géovisualisation, offrant une diversité de services à l'utilisateur :

### 3.5.1. L'interactivité

Dans le processus d'interactivité, la souris est devenue l'outil central, assurant le lien entre l'utilisateur et l'ordinateur. C'est au moyen de la souris que l'utilisateur peut sélectionner un point sur la carte, sélectionner des données, des cartes ou accéder aux outils de zoom, déplacement dans le plan... Parmi les outils assurant l'interactivité, on distingue les outils de sélection, de navigation et de positionnement.

- Les outils de sélection permettent à l'utilisateur de sélectionner et d'interroger les données géographiques et cartographiques à afficher et d'accéder à du contenu informationnel et multimédia (textes, photos, vidéos, son). Plusieurs modes de sélection peuvent être proposés : la sélection via des boutons radios ou de menus déroulants ; la sélection visuelle via le clic de la souris directement sur la carte ou au moyen d'une forme géométrique englobante dessinée à la volée sur la carte et la sélection textuelle pour une recherche par mots clés.
- Les outils de navigation offrent à l'utilisateur la possibilité d'explorer la carte en se déplaçant dans l'espace au moyen du curseur de la souris, ou de la déplacer afin de la visualiser les parties de la carte qui ne se situent pas dans son champ visuel. Ils permettent aussi de voir plus précisément un objet ou une zone sélectionnée (zoom in / out) ou bien d'avoir une vue d'ensemble de l'espace cartographié (full-extent). Le déplacement du curseur de la souris, le pan, le zoom in/out, le full-extent sont les outils de base qui caractérisent les environnements interactifs de cartographie. Lorsque l'environnement intègre la troisième dimension ou que l'on se situe dans une cartographie virtuelle via la visualisation d'ortho photo, de MNT ou d'image satellitaire, le survol (fly over) vient alors compléter la gamme d'outils.
- Les outils de positionnement qui permettent à l'utilisateur de se situer sur la carte qu'il est en train de visualiser : le curseur géographique, qui permet à l'utilisateur de connaître les coordonnées géographiques ou les identifiants géographiques (nom, code ...) du point qu'il est en train de survoler ; le carton de situation (ou parfois appelé carte de référence), qui permet à l'utilisateur de situer la zone en cours de visualisation par rapport à l'ensemble de l'espace géographique intégré dans l'application. L'écran ayant une dimension définie, l'espace visualisé à l'écran n'est qu'un sous ensemble de l'espace cartographié.

### 3.5.2. Le multimédia

En rendant les cartes cliquables, et en appliquant les techniques de l'interactivité, celles-ci deviennent multimédia :

- Le passage de la souris sur un élément de la carte permet d'obtenir une information sémantique via une info-bulle (affichage du nom de l'objet survolé ou d'informations descriptives) ;
- des hyperliens associés aux objets cartographiés affichent des informations présentées sur des supports différents telles que les images, textes, photos, vidéo ... Cette technique permet de contextualiser l'élément cartographié et d'accéder à des informations temporelles.
- L'interrogation des cartes via des requêtes visuelles repose sur le principe des « hypermaps » (Laurini & Milleret-Raffort, 1990) où les liens hypertextes et hyperdocuments sont associés aux entités géographiques, créant ainsi des hypercartes. Ce procédé permet une navigation non séquentielle de la carte par l'indexation d'un point de la carte vers d'autres documents cartographiques, ou d'autres couches d'informations géographiques. Il permet d'intégrer au sein d'un

même environnement des données hétérogènes, peu structurées et multidimensionnelles associant dimension spatiale et temporelle définies selon différents maillages cartographiques ou différentes granularités temporelles.

- le zoom dynamique (appelé aussi zoom sémantique) correspond à un changement d'échelle cartographique, de niveau de généralisation et modifie la forme des objets. Il induit un changement de contenu cartographique et graphique.

L'introduction de l'interactivité et du multimédia dans les cartes renforce donc le pouvoir informationnel des cartes et permet de mieux comprendre les données et le sens de la carte.

### 3.5.3. Le multifenêtrage et la synchronisation

Une des innovations majeures qui caractérisent ces environnements de géovisualisation se situe dans la mise en œuvre de l'interface elle-même. Il ne s'agit pas uniquement de construire des applications visualisant une seule carte, qu'elle soit animée, cliquable ou multimédia, mais de développer des interfaces multidimensionnelles composées de plusieurs fenêtres représentant chacune une dimension de l'information géographique. Comme dans les applications de « scientific visualization », la carte occupe une fenêtre et d'autres fenêtres sont là pour donner d'autres vues graphiques, cartographiques ou tabulaires représentant les trois dimensions de l'information géographique définies selon la Triade de Peuquet (où ? Quoi ? Quand ?) (Figure 18).

Ainsi peuvent être combinées au sein d'un même environnement des cartes interactives, multimédia ou animées, des graphiques temporels ou atemporels, des tableaux de données en fonction des différentes dimensions de l'information à représenter, de ses caractéristiques et des objectifs attendus. Ces fenêtres sont liées entre elles par des liens dynamiques et leur fonctionnement repose sur le principe de synchronisation et l'utilisation de requêtes visuelles effectuées au moyen de la souris, directement sur la carte ou le graphique (Figure 19). Ainsi dans le cas d'un survol d'un objet dans une fenêtre, la surbrillance s'applique aussi à tous les éléments situés dans les autres fenêtres qui sont en lien avec l'objet survolé. Chaque requête visuelle effectuée par l'utilisateur sur une des fenêtres déclenche alors deux actions successives : 1) la requête est interprétée et exécutée et 2) les résultats sont répercutés sur les autres fenêtres de façon dynamique (Figure 20)

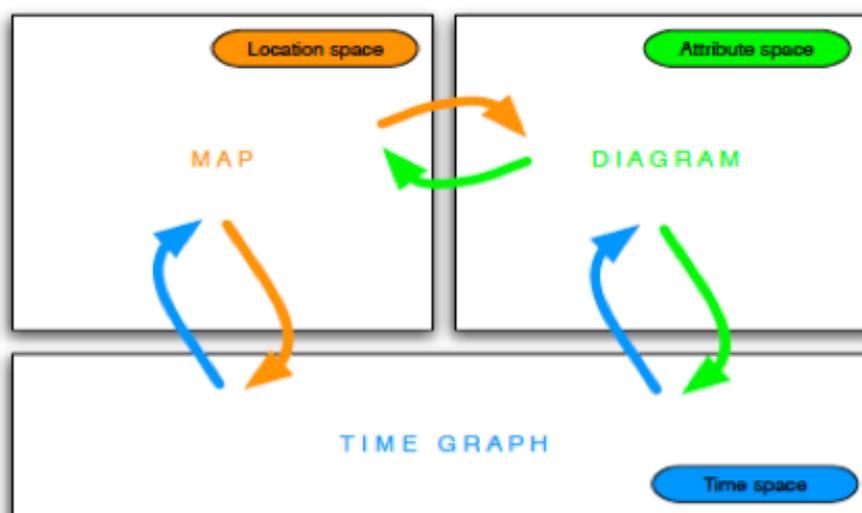


Figure 19. Multifenêtrage et synchronisation dans les interfaces de géovisualisation (d'après Kraak, 2010)

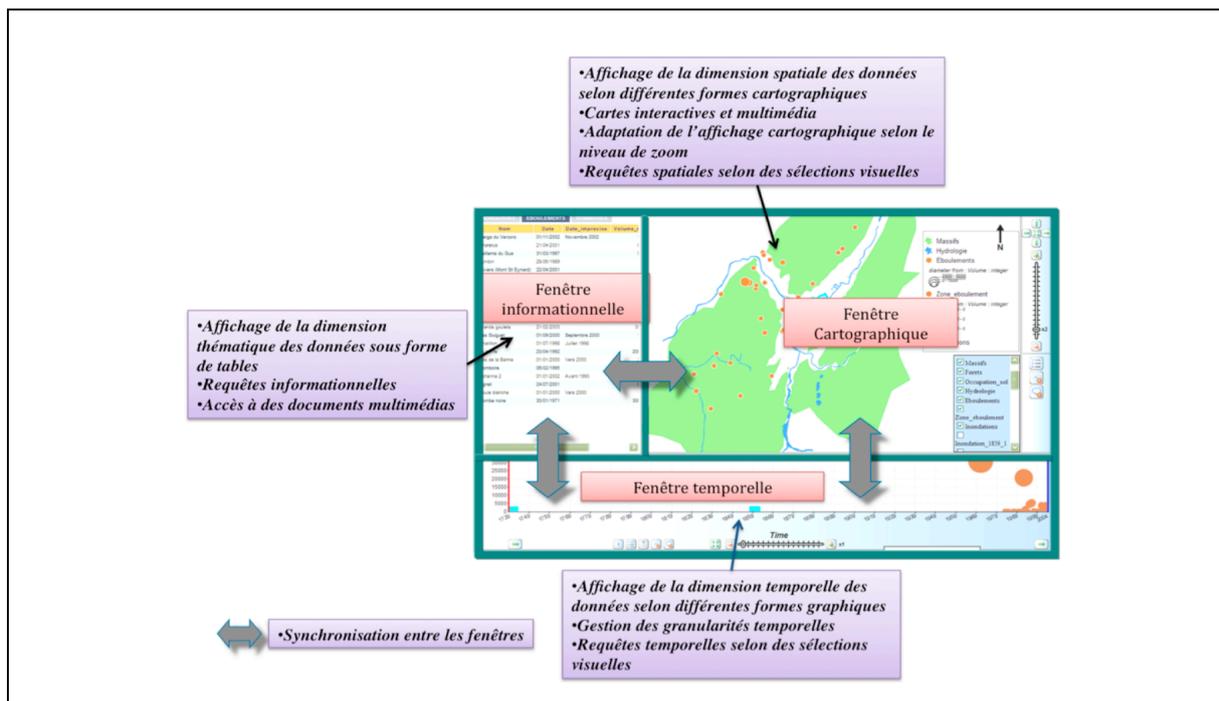


Figure 20. Fonctionnement d'une interface de géovisualisation : l'exemple de GenGHIS (Davoine & al, 2012)

### 3.5.4. L'animation

Comme évoqué précédemment, une visualisation animée voit son contenu évoluer dans l'interface selon un paramètre temps (temps de l'animation). Certaines animations visent à représenter des dynamiques dans le temps (évolution ou variation d'indicateurs, changement d'états, déplacement d'individus ou d'objets...), tandis que d'autres servent à mettre en évidence des éléments graphiques ou cartographiques (clignotement d'éléments sur la carte ; apparition / disparition répétée d'une couleur ou d'une forme sur la carte ...) ou à modifier l'expression graphique de la carte et effectuer des transformations cartographiques (transformation / déformation géométrique ou graphique des objets sur la carte ; transition animée d'une carte statique vers une anamorphose ; effets vidéos...). L'animation cartographique permet en plus de raconter une histoire, d'expliquer un processus, de révéler des modèles ou relations qui ne seraient pas lisibles sur une carte statique. Elle donne une véritable sensation du mouvement (Ormeling, 1995) non pas en raison des variables visuelles spécifiques ou de l'observation d'une évolution, mais grâce à une déduction de ce que le lecteur mémorise en observant l'animation. Aux variables visuelles classiques, s'ajoute l'impression visuelle commandée par les variables dynamiques et captées par le mécanisme œil-cerveau, qui enregistre les images sans les retenir et ne retient que le mouvement (Kraak & Ormeling, 1995). Différents types d'animations peuvent être envisagés pour représenter les dynamiques des territoires : affichage de séquences d'états d'un phénomène donné ou de différences successives représentant le changement (cf section 3.1, 3.2 & 3.3) ; affichage d'interactions entre 2 ou plusieurs phénomènes ; affichage de motifs temporels comme des traces.

Cependant, pour repérer, analyser et comprendre des tendances spatio-temporelles et des dynamiques territoriales, il est nécessaire d'interagir avec l'animation. Le lecteur doit pouvoir mener de façon simultanée un raisonnement spatial et un raisonnement temporel. Pour cela il doit pouvoir visualiser et interpréter simultanément la séquence temporelle et le rythme de l'animation. Or l'animation pose des problèmes de lecture liés notamment à la vitesse

d'affichage, au temps de lecture, aux difficultés de perception des objets graphiques et de leurs sémantiques. Par ailleurs ce qui se passe entre chaque image intermédiaire est aussi important, voire plus que ce qui est représenté sur les images (Peterson, 1995). Il est donc indispensable d'associer à l'animation l'interactivité, en disposant d'outils permettant d'interpréter et de contrôler l'animation, mais aussi de gérer l'étendue et la résolution temporelle. Ces outils, considérés aussi comme des légendes temporelles, peuvent être simples ou complexes (Edsall & Peuquet, 1997). Ils peuvent être numériques (heure ou date numérique), graphiques (sous la forme d'une ligne de temps ou d'un diagramme temporel ou d'une barre de défilement), iconiques (horloge, calendrier) (Cauvin & al, 2008). Le lien entre la carte et l'outil temporel repose sur le principe de synchronisation : au fur et à mesure que le temps écoulé défile dans la légende temporelle, les objets géographiques correspondant apparaissent ou disparaissent de la carte, se déforment ou se déplacent, changent de couleur ou de symbologie selon que l'on s'attache à représenter la dynamique d'un phénomène exploré à partir de séries temporelles ou des variations de la forme de la mesure de ce phénomène. L'utilisation de ces outils (Peterson, 1999 ; Kraak & al, 1997) offre la possibilité de considérer les temporalités dans leur contexte de déroulement : temps linéaire (passé, présent, futur) et le temps cyclique (saisons, jour/nuit, fréquence de retour). Ils constituent aussi un moyen d'interroger les données dans leur dimension temporelle.

- A minima, le contrôle de l'animation doit s'effectuer au moyen d'une barre de défilement qui indique l'écoulement du temps et qui intègre les fonctionnalités « Arrêt », « avance » ou « retour » et « réglage de la vitesse » (Figure 21);
- Selon que l'on s'intéresse à la représentation de phénomènes cycliques, périodiques ou saisonniers, ou bien linéaires, l'outil de contrôle sera de type TimeWheel ou Timeline (Figure 22).
- Dans le cas de granularités temporelles multiples, il peut être opportun de combiner plusieurs types d'outils graphiques (ligne de temps et représentation cyclique ; ligne de temps et représentation numérique...) (Figure 22).

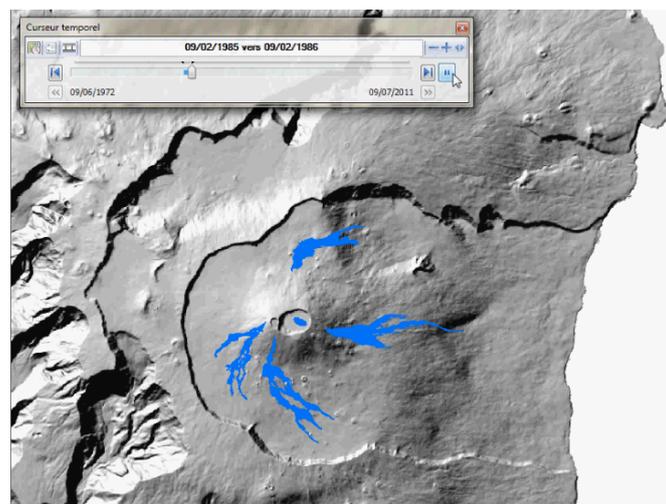


Figure 21. Barre de défilement utilisé pour la gestion de la carte animée représentant l'historique des coulées de lave du Piton de la Fournaise de 1972 à 2011 (Davoine, 2014).

- La combinaison d'une représentation numérique et d'une ligne de temps peut aussi être une façon de représenter différentes granularités temporelles (Figure 22).

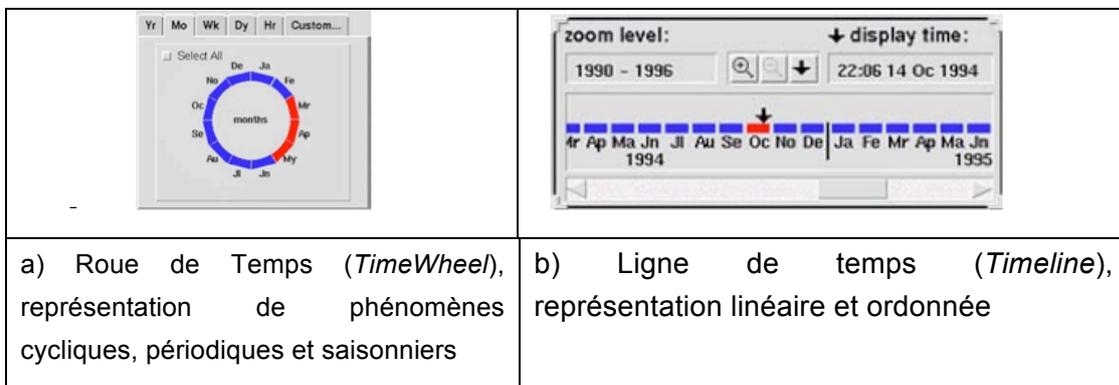


Figure 22. Exemples de légende temporelle (Edsall and Peuquet, 1997).

- Le diagramme temporel qui peut se présenter sous différentes formes (diagramme en bâtons, courbe, nuage de points) présente l'intérêt d'associer une information thématique (Figure 23).

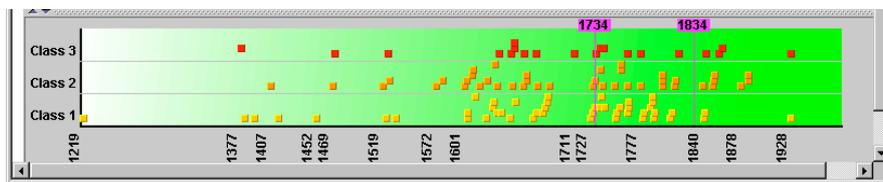


Figure 23. Exemple de diagramme temporel utilisé dans l'application SPHERE. Le défilement s'effectue par année ou par période (Davoine, 2014)

- Dans certains cas, la légende temporelle peut aussi être sonorisée. Ce procédé consiste à attirer l'attention de l'utilisateur en annonçant les dates ou les périodes pendant le défilement de l'animation.
- Lorsqu'on s'intéresse à l'espace temporel entre événements, une proposition consiste à associer un graphique temporel pour la chronologie des événements et la timeline sur laquelle les périodes « inactives » sont mises en évidence (Figure 24).

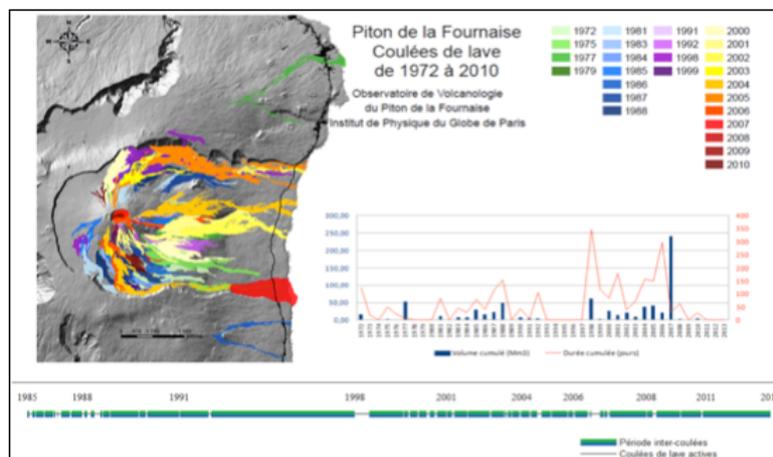


Figure 24. Proposition pour la prise en compte de l'espacement temporel dans une interface de géovisualisation. L'exemple des éruptions du Piton de la Fournaise (Saint-Marc & al, 2013).

### 3.5.5. Des outils de géovisualisation à la diversité des usages

Aujourd'hui, les outils de géovisualisation s'intègrent donc dans des systèmes de « visualisation » et permettent d'assurer différents services répondant à différents objectifs (Tableau 2). La carte reste bien entendu au cœur de ces environnements et les outils qui les composent permettent certes de localiser, de présenter les données, mais aussi de les interroger, de proposer des synthèses à la volée, et des analyses et de les explorer. Dans ce dernier cas, on donne en général les moyens à l'utilisateur d'éclairer lui-même son propre

jeu de données, de construire son propre éclairage du phénomène grâce à des outils de géovisualisation. Plusieurs niveaux de lecture et de « contextualisation » des informations spatio-temporelles sont permis selon différentes entrées (spatiale, temporelle, spatio-temporelle), allant jusqu'à permettre la construction de scénarii.

Outils / actions	Services rendus	Objectifs
Zoom / pan/ survol/ Infobulles / vue d'ensemble / modification de l'angle de vue	Navigation	Synthèse
Curseur de position / carton de situation	Situation	
Clic sur la carte / Activation des éléments de la légende via des boutons radios ou menus déroulants	Sélection	
Requêtes multicritères	Interrogation	Analyse
Changement de l'apparence des cartes, de la symbologie, du fond de cartes	Modification	
Agencement multi-vues synchronisées / Requêtes visuelles / Filtrage / Switch multionglets / transition vers d'autres vues	Contextualisation / Ré-évaluation (ou re-calcul) / Ré-expression / consultation multiniveaux	Exploration

Tableau 2. Outils de l'interactivité et services rendus (Davoine, 2014).

La diversité des outils de géovisualisation et des services qu'ils proposent ont profondément modifié le rôle et la place de l'utilisateur dans le processus de production cartographique et les usages des environnements de géovisualisation. Dans ces applications, l'utilisateur se situe au centre du dispositif cartographique selon le modèle d'interaction « User-Map » défini par MacEachren (1994). L'auteur identifie clairement les nouveaux usages et organise la production cartographique selon trois dimensions à savoir (Figure 25) :

- le type de public : entre privé (expert) et public (novice);
- l'état de la connaissance : révéler l'inconnu ou présenter le connu ;
- le niveau d'interaction proposé à l'utilisateur : de faible à élevé.

Selon ces trois critères mais aussi le degré de relation entre les données, l'environnement peut aider à explorer des données, à analyser et comprendre un phénomène, à synthétiser un ensemble d'observations ou de variables, ou simplement à présenter des résultats. Ainsi on peut positionner à un extrême d'un cube les productions cartographiques de présentation s'adressant à un large public, communiquant une information élaborée et connue, ou le degré de liberté de l'utilisateur est minime. A l'opposé on trouve les environnements d'exploration des données, qui proposent une interactivité forte à un public plus spécialisé, dont l'objectif est de comprendre les données et de révéler des structures.

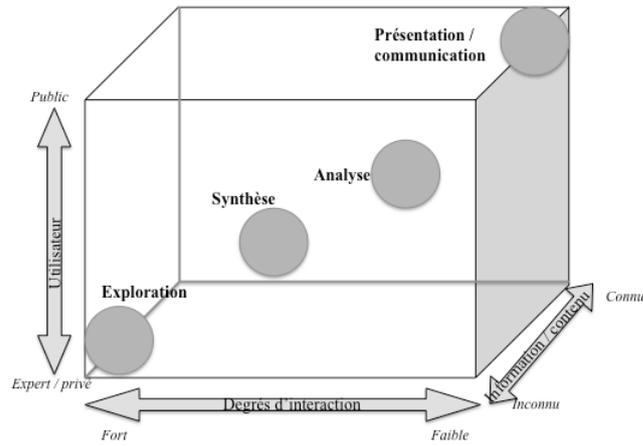


Figure 25. Géovisualisation au prisme de 3 dimensions (MacEachren, 1994)

Dans la partie qui suit, le cube de MacEachren (1994) nous servira de référence. Publié il y a 20 ans, ce cube illustre des différences entre outils de visualisation dans un contexte de pratiques. Qu'en est-il aujourd'hui avec le développement de ces technologies, la diffusion de leurs usages et la démocratisation des nouvelles productions ?

## 4. Analyse de la diversité des productions

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes 1 et 2, l'aspect temporel des processus est rarement appréhendé de façon conjointe avec l'espace dans les visualisations qui sont produites : il s'agit le plus souvent de représentations de type « snapshots » (suite de clichés), c'est-à-dire où le temps est vu comme une dimension extérieure sur laquelle se positionnent différents états de l'espace. Les processus ne sont pas représentés, tout au plus les changements. Notre hypothèse est que les problématiques de représentations des temporalités des territoires demeurent : on reste sur des représentations où l'innovation réside essentiellement dans la mise en situation par les nouvelles technologies, et non par des nouvelles conceptions des représentations spatio-temporelles. Les rares visualisations combinant cartographie et temps ne traitent souvent que sommairement des temporalités, en plaçant le temps dans l'attribut cartographié ou en déroulant une animation linéaire. La grande innovation que permettent ces outils est cependant la contextualisation (multifenêtrage) et le fait de proposer des vues multiples en termes de granularité temporelle ou spatiale. Ces outils permettent par exemple d'appréhender le temps de façon cyclique (l'exemple le plus commun étant la succession des saisons d'année en année) ou de proposer une exploration à différents niveaux de granularité (échelle de la semaine, du mois, de l'année, etc.).

Nous nous proposons ici de mettre la production actuelle, présente sur le web, à l'épreuve de cette hypothèse, sur la base d'une grille permettant d'identifier d'une part la diversité des productions et d'autre part la manière dont sont utilisés les différents outils de la géovisualisation, comment leur combinaison vient enrichir les représentations.

Nous présentons dans un premier temps le corpus d'applications analysées et le positionnons dans le référentiel proposé par Mac Eachren (1994) et présenté précédemment (§3). Nous nous attacherons ensuite à présenter la grille utilisée pour identifier les spécificités de ces environnements, tant dans la formalisation de l'espace et du temps que dans les outils mis en œuvre pour les représenter. Chaque développement a fait l'objet d'une description selon une grille détaillée que l'on trouvera en annexe 1 de ce rapport. Nous en présentons une synthèse critère par critère. Puis, nous présentons les résultats d'une analyse multivariée, permettant d'identifier quelques catégories représentatives de la production actuelle. Par ailleurs, un site internet accompagnant ce rapport (<http://www.map.archi.fr/jyb/puca/>) synthétise les positions des environnements relativement à chacune des entrées qui vont être détaillées dans le §4.2.

### 4.1. Positionnement du corpus

Le corpus analysé se compose de 47 sites internet. Le choix a été fait de ne sélectionner que des applications diffusées sur internet. Le web est aujourd'hui le vecteur principal de diffusion des productions cartographiques, soit parce que ce sont des développements spécifiquement réalisés pour être diffusés sur le web, soit parce ces applications ont été développées dans d'autres environnements mais sont quand même relayées sur le web, via des vidéos par exemple. La collecte s'est opérée par exploration du web sur une période de 6 mois par 5 personnes différentes, indépendamment, chacune ayant des thèmes de recherche différents. Le seul critère de sélection étant « représentation de phénomène se déroulant dans le temps et dans l'espace » sans critère a priori du public ciblé, ni du

phénomène, ni des technologies mises en œuvre. On ne peut bien évidemment pas évaluer la représentativité de ce sous ensemble, mais les intersections entre les différentes collectes ont permis d'en évaluer la pertinence : le fait que ces intersections existent mais soient faibles relativement au reste, valide le fait que le sous-ensemble reflète une certaine diversité des développements spatio-temporels qui sont mis sur le web. Une première validation a été opérée en positionnant ces applications relativement aux trois dimensions qui sous-tendent le cube de Mac Eachren (1994), à savoir: l'interactivité, le lien avec l'information et le type de public. En positionnant le corpus étudié relativement à ces trois dimensions, nous avons pu d'une part évaluer la diversité des applications, mais aussi l'évolution des développements par rapport au référentiel défini il y a vingt ans. Nous présentons simultanément les critères et la distribution du corpus sur l'échelle des modalités considérées. La liste des sites analysés se trouvent dans l'annexe 1. Le Tableau 3 synthétise ces distributions.

- L'interactivité : ce critère a été évalué selon 2 modalités selon que l'application était interactive ou pas. Le niveau de spécialisation des outils d'interactivité mis à la disposition des utilisateurs, a été évalué selon deux modalités : niveau de base (outils classique de déplacement, de zoom...) et outils spécifique (légende, graphique...). La grande majorité des applications sont interactives, ce qui est cohérent avec notre point de collecte, mais qui prouve aussi que qu'un nombre significatif d'applications sont encore développées sans utiliser cette caractéristique. Les applications rencontrées qui ne sont pas interactives, traitent soit du spatio-temporel via la sémiologie graphique, soit sont simplement animées. L'interactivité permet d'enrichir l'expérience de l'utilisateur, en lui offrant la possibilité de personnaliser la visualisation ou de pousser l'analyse s'il le souhaite. De plus, à l'heure du Web 2.0, les utilisateurs d'Internet souhaitent de plus en plus être acteurs de leur navigation, et non plus seulement spectateurs. Cette tendance est entretenue chez les concepteurs des applications.
- L'animation : environ la moitié des applications sont animées. Cela va dans le sens de notre hypothèse, à savoir que l'animation se prête particulièrement bien à la représentation du temps, car elle permet de « dérouler » le temps et présenter une histoire ou l'évolution d'un paramètre comme une maquette de la « réalité ». Cependant il ne s'agit pas de la seule façon de représenter le temps, ce qui peut expliquer qu'on la rencontre seulement dans la moitié des cas. Certaines animations visent à représenter des dynamiques dans le temps (ex : variation d'indicateurs démographiques au cours du temps, dans l'Atlas de l'INED) tandis que d'autres servent uniquement à mettre en évidence des éléments graphiques (ex : transition animée d'une carte ordinaire vers une carte en anamorphose)
- Lien dynamique avec les données : c'est le critère que nous avons utilisé pour rendre compte de la 3<sup>e</sup> dimension du cube, à savoir la connaissance sur les données. Lorsque les données sont « connues » du producteur de l'application, c'est une vue cartographique synthétique qui est donnée à l'utilisateur qui n'est plus « connectée » aux données. Tandis qu'un lien dynamique vers les données met l'utilisateur dans un rôle de « producteur » d'une carte pour explorer les données. Par ailleurs la façon dont l'application est liée aux données influe sur ses potentialités, en termes de généralité (outil applicable à d'autres jeux de données) et de fonctionnalités (potentialités d'analyses sur les données. 64% des applications ont un lien dynamique avéré avec les données. Cela concerne donc une grande majorité des applications.

	Possède	Ne possède pas	Indéterminé
Interactivité	89%	11%	
Animation	51%	49%	
Lien dynamique avec les données	64%	25%	11%

Tableau 3. Répartition des applications du corpus selon les trois critères de MacEachren (1994)

Si l'on reprend le référentiel proposé par MacEachren pour décrire les types d'applications, il semblerait tout d'abord qu'il y ait une translation du cube le long de l'axe « interactivité » puisque quasiment toutes les applications permettent à l'utilisateur d'interagir avec elles que ce soit pour zoomer ou pour explorer plus précisément les données. La Figure 26(a) signifie ce déplacement à partir de la situation théorique de référence (en pointillés). Par ailleurs la Figure 26(b) illustre le positionnement des différentes applications. Les cercles sont proportionnels au nombre d'applications concernées par le positionnement. La couleur est relative au type. Par rapport aux quatre types de cartographie de références du cube de MacEachren, deux nouveaux types émergent : la « contextualisation des données » et la « présentation des données ». Il semblerait que le déplacement vers l'interactivité s'accompagne de développements très tournés vers les données, au détriment sans doute des types « analyse » et « synthèse ». Il peut s'agir de deux processus disjoints (déclin des 2 types d'un côté, et émergence de 2 autres de l'autre) ou d'une transformation de conception d'environnement. Quoiqu'il en soit ce deuxième déplacement (illustré sur la Figure 26(b) par des flèches) conduit à penser que les données s'observent plus que les phénomènes analysés, et que l'on « présente » moins de synthèses et plus de données ; l'analyse est remplacée par une mise en contexte ou par des visualisations originales des données qui peuvent elles-mêmes nécessiter des analyses poussées mais qui sont transparentes pour l'utilisateur. Parallèlement, le type « récit » est de plus en plus utilisé : la synthèse s'anime sous forme de récit où le narrateur (spécialiste) n'est plus nécessaire grâce aux effets de sémiologie dynamique et l'utilisateur peut, grâce à l'interactivité et l'animation, rejouer le récit à l'envie.

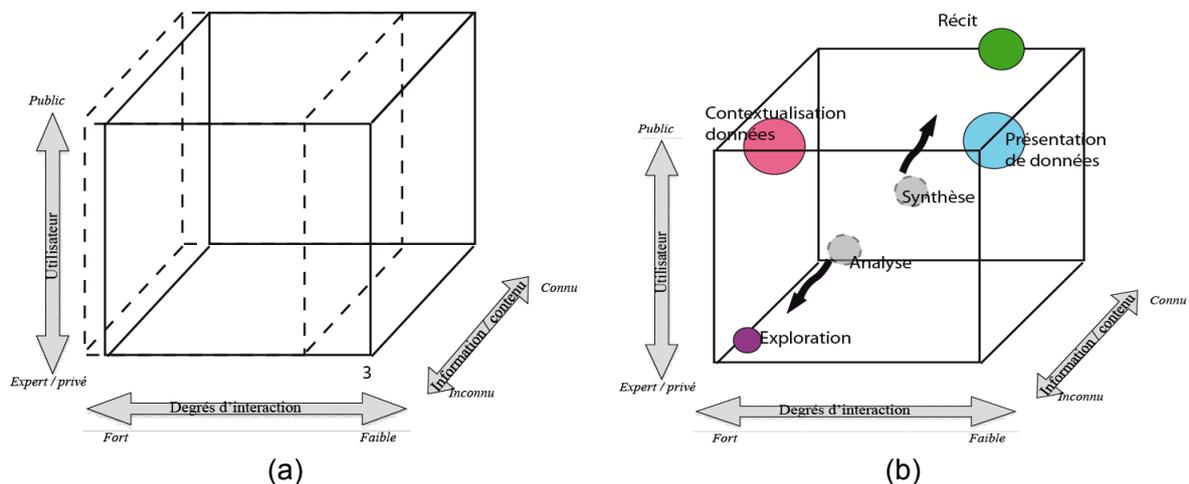


Figure 26 : Le corpus analysé relativement au référentiel proposé par MacEachren (1994)

## 4.2. Méthodologie d'analyse

L'analyse de notre corpus repose sur une grille structurée en trois niveaux : conceptuel, applicatif et factuel. Les fiches de l'annexe 1 restitue l'ensemble de la grille et montrent comment, d'une application à l'autre, elle permet de présenter les applications de façon comparable.

### 4.2.1. Niveau de la conception : les dynamiques ciblées et les services rendus par la visualisation

Il s'agit ici d'identifier le phénomène représenté et les objectifs, les attentes auxquelles répondent les applications de visualisation dynamique (Tableau 4). Classiquement deux types de phénomène sont identifiés :

- Les processus d'évolution, qui correspondent à un changement d'état. Celui-ci peut consister soit dans la variation ou la modification de la forme d'une entité spatiale au fil du temps, soit dans la modification de la valeur des variables qui y sont rattachées. Par exemple, l'évolution des frontières des pays correspond à une transformation géométrique de l'entité géographique « pays » (modification de la forme du pays et de la limite des frontières). L'expansion des villes correspond aussi à ce type de transformation.
- Les processus de mobilité correspondent à des changements de localisation d'objet géographiques dans l'espace au cours du temps. De nombreuses réalisations s'intéressent à la représentation des mobilités des populations au sein d'un territoire ou entre territoires. La mobilité peut être appréhendée à l'échelon élémentaire sous forme de trajectoire des individus ou des objets, ou agrégée à l'échelon des mailles d'un découpage géographique sous forme de flux entrant et sortant.

A partir de là chacun des deux types est subdivisé (Tableau 4, tableau 5). On trouve :

- des changements : la localisation d'événements (ex : catastrophes naturelles, ouverture / fermeture de services, conflits ...), les changements d'états de l'espace (ex : variation d'occupation du sol, densité de population, ...), les changements de forme (ex : étalement urbain, ...)
- des mouvements : les déplacements d'individus (ex : déplacements quotidiens des individus, trajectoires de navires, ...) et les flux ou déplacements de quantités (ex : volumes d'imports/exports, ...).

- Critères	Modalités	% dans le corpus
Dynamiques spatiales	Dynamique de localisation d'événements (catastrophes naturelles, ouverture / fermeture de services, conflits...)	25%
	Changement d'état de l'espace (occupation du sol, urbanisation, ...)	38%
	Changement de forme (marée noire, ville..)	6%
	Déplacements d'individus (trajectoires quotidiennes des individus)	28%
	Flux, échanges entre lieux (navettes domicile - travail ...)	19%

Tableau 4 : types de dynamique spatiales

Le Tableau 5 donne un exemple de chacun des types issu du corpus. Une application peut permettre de visualiser l'un ou plusieurs de ces types de dynamiques à la fois.

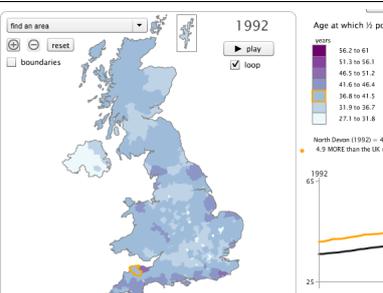
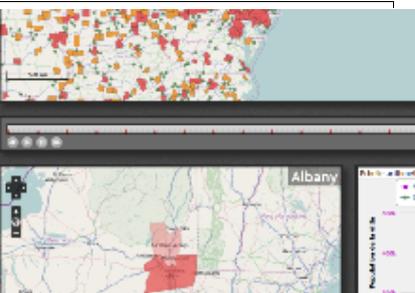
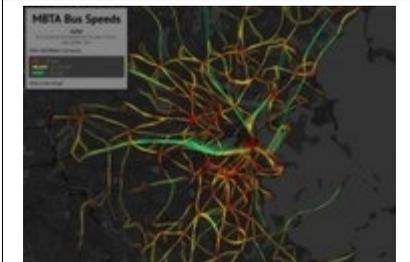
		
Localisation d'événements ( <i>The Growth of Newspaper accross the US</i> )	Changement d'états de l'espace ( <i>Ageing and the UK</i> )	Changement de forme ( <i>Harmonie-Cités</i> )
		
Déplacements d'individus ( <i>Bostonography</i> )	Déplacements de quantités / flux ( <i>Small arms and ammunition</i> )	

Tableau 5 : Les types de dynamiques représentées

La dynamique de changement d'état de l'espace est prédominante dans les applications. On la rencontre dans près de 40% des cas, rarement conjointement avec d'autres dynamiques. A elle seule, elle représente 50% du nombre d'occurrence de toutes les autres dynamiques réunies. Les dynamiques de territoire sont en effet souvent appréhendées comme des variations d'indicateurs (par exemple démographiques) par unités spatiales, qui segmentent ce territoire (par exemple communes, départements, etc.).

A l'opposé, les changements de forme ne sont pas souvent représentés dans les visualisations temporelles (seulement 6%). Les autres dynamiques se situent dans une situation intermédiaire (rencontrées dans 19% à 28% des applications).

Le deuxième critère du niveau de la conception est le service rendu, c'est-à-dire l'objectif visé par l'auteur de la visualisation. L'objectif conditionne la façon dont les phénomènes sont représentés, dont la visualisation est « mise en scène » et influe sur l'utilisation qui sera faite de l'application. Ainsi, les services rendus par les visualisations peuvent être la présentation simple de données d'inventaire, la présentation de scénario ou de récits, ou l'exploration et l'analyse de jeux de données. Certaines visualisations rendent également un service de prédiction de données (Tableau 6 , Tableau 7)

- Critères	Modalités	% dans le corpus
Services rendus	Présentation de données (Localisation d'objets)	43%
	Présentation de récits	40%
	Exploration	47%
	Prédiction-prospective	21%

Tableau 6: Types de services rendus

Le service rendu par les applications le plus fréquent est l'exploration (47% des applications), suivi de près par la présentation de données (43%) et la présentation de récit (40%). Le service de prédiction-prospective ne concerne que 21% des applications.

Les applications rendent souvent plusieurs services à la fois. Le service d'exploration est légèrement prédominant sur les autres : il représente 45% du nombre d'occurrence de tous les autres services réunis, contre environ 38% pour les présentations de données et de scénarios. On peut l'expliquer par le fait qu'il apporte une valeur ajoutée à la simple présentation et qu'il est attractif pour certains utilisateurs qui souhaitent en savoir plus sur la thématique présentée. Il peut permettre d'accéder à un niveau supérieur de compréhension des phénomènes par une analyse plus poussée.

En revanche, le service de prédiction-prospective est moins représenté. Il est sans doute plus complexe à mettre en œuvre, car sous-tendu par des modèles de prévision. Il s'agit d'un cas particulier comparé aux autres types de services.

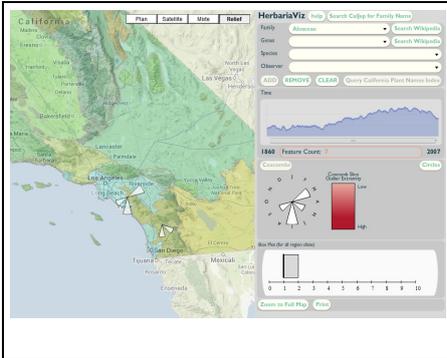
	
Présentation de données ( <i>HerbariaViz</i> )	Exploration de données ( <i>Crime Analysis</i> )

Tableau 7 : Les types de services rendus

Certaines visualisations, en délivrant par exemple un contenu technique et de multiples outils d'analyses, sont conçues pour s'adresser plutôt à un public de spécialistes du domaine qu'elles présentent. D'autres en revanche présentent un contenu qui se veut facile d'accès,

destiné à tous les publics. Ces deux publics ne sont pas antagonistes et on peut rencontrer des applications qui s'adressent à la fois aux deux publics en proposant des fonctionnalités adaptées à chacun. Comme le montre le Tableau 8, les applications étudiées s'intéressent aussi bien au grand public qu'aux spécialistes.

Type de public visé	Part dans le corpus
Grand public	62%
Professionnels et spécialistes	68%

Tableau 8: type de public visé

Cependant une part importante des applications (30%) ciblent à la fois les deux types de publics, en proposant des données faciles d'accès pour le grand public, mais également des données et fonctions plus avancées pour les professionnels et spécialistes.

#### 4.2.2. Niveau applicatif : processus, modes de représentation et d'exploration

Ce deuxième niveau de la grille permet de décrire les choix réalisés dans les applications. On s'attache à analyser la représentation du temps, la représentation de l'espace, les autres éléments (diagramme-graphique, histogramme, ...) présents dans la visualisation et l'interactivité relative aux différents composants.

##### - **Représentation du temps**

Le temps des événements peut être représenté de différentes façons : par le temps dans le cas d'une visualisation animée (ex : une seconde d'animation représente une année de temps), par de l'espace grâce à un graphique ou une ligne de temps (ex : 1cm sur le graphique représente une année), ou par l'attribut des données (ex : coloration des événements en fonction de leur date).

Dans le corpus analysé, le temps est très souvent représenté par l'espace dans les visualisations de dynamiques territoriales (87% des applications). Dans près de la moitié des cas (49%), il est représenté par l'animation (Tableau 9, Tableau 10).

La majorité des applications utilisent donc une représentation spatiale pour figurer le temps, par exemple sous forme d'une ligne de temps ou de graphiques. Cette prévalence peut s'expliquer par l'apport d'avoir un repère visuel du temps qui passe, par exemple pour se figurer sa vitesse d'écoulement lors d'une animation. Cela explique donc aussi que 40% des applications utilisent à la fois le temps de l'animation et l'espace pour représenter le temps. En réalité, seules 36% des applications utilisent uniquement l'espace pour représenter le temps, et 9% utilisent uniquement le temps.

Types de représentation du temps	Part dans le corpus
Par le temps	49%
Par l'espace	87%
Par l'attribut	23%

Tableau 9:Types de représentation du temps

<p>Représentation du temps par l'espace dans une ligne de temps avec curseur (<i>Atlas de l'INED</i>)</p>	<p>Représentation des temps de trajet par l'espace qui se déforme (<i>Tube Map London</i>)</p>	<p>Représentation du temps dans l'attribut des cantons, ici par la couleur (<i>Mega-Commuters Take Manhattan</i>)</p>

Tableau 10: Différents exemples de représentations du temps

L'un de nos postulats lors de cette étude était que le temps est représenté le plus souvent dans l'attribut des données. Or, il n'est finalement représenté par l'attribut que dans 23% des applications étudiées. Ce résultat s'explique sans doute par la démarche de constitution du panel : les applications du corpus couvrent divers types de visualisation et pour la plupart innovantes. Par conséquent, une représentation temps-espace donnée n'apparaît qu'une seule fois dans notre panel, alors qu'elle peut être utilisée dans de très nombreuses applications sur le web. La proportion dans le panel n'est donc pas un indicateur du nombre absolu d'utilisation de cette représentation à travers le web, mais un indicateur de diversité.

#### - Représentation de l'espace

L'espace dans lequel se situent les données est le plus souvent représenté par une carte. Mais il peut également être représenté par un graphique, ou par un cartogramme.

Le Tableau 11 montre que l'espace est presque toujours représenté par une carte (98% des applications). Lorsque ce n'est pas le cas, il est représenté sous forme de schéma-cartogramme dans 9% des applications (et est associé dans 75% des cas à une représentation sous forme de carte). La représentation de l'espace par un graphique concerne quant à elle 19% des applications.

La représentation sous forme de carte est donc largement prédominante. Les représentations alternatives de l'espace, qui permettent d'apporter un autre regard sur les données, sont donc encore relativement marginales.

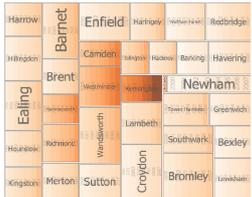
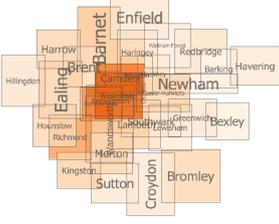
Type de représentation de l'espace	Exemple	Part dans le corpus
Carte		98%
Graphique		19%
Cartogramme - schéma		8%

Tableau 11 : types de représentation de l'espace (source : *Treemaps House Prices*)

### - Présence de graphiques

Des graphiques peuvent être inclus dans les visualisations. Ils permettent généralement d'apporter un autre point de vue que la carte sur les données et/ou de présenter d'autres variables thématiques. Ils peuvent être temporels, c'est-à-dire représenter des temporalités, ou bien atemporels. Certaines visualisations combinent ces deux types de graphiques (Tableau 13). Comme le montre le Tableau 12, 55% des applications du corpus intègrent des graphiques, en majorité des graphiques temporels (71% des graphiques rencontrés). Les graphiques temporels sont environ 2,5 fois plus nombreux que les graphiques atemporels. Ceci peut s'expliquer par le fait que la dimension temporelle est inhérente aux visualisations de dynamiques des territoires. Leur prédominance semble donc logique (présents dans 47% des applications), même si les graphiques atemporels apportent une information différente (présents dans 19% des applications). 11% des applications contiennent à la fois les deux types de graphiques.

Types de graphiques	Part dans le corpus
Graphique temporel	47%
Graphique atemporel	19%
Aucun	45%

Tableau 12 : Les types de graphiques dans les applications du corpus

<p>Graphique temporel : le temps est représenté sur l'axe des abscisses (<i>OECD Regional eXplorer</i>)</p>	<p>Graphique temporel : les cercles concentriques représentent des durées (<i>Commuting Scales</i>)</p>	<p>Graphique atemporel : le graphique permet de comparer les valeurs des régions (<i>InstantAtlas Dynamic Report</i>)</p>

Tableau 13:Exemples de types de graphiques dans les applications du corpus

#### 4.2.3. Niveau factuel : grilles détaillées comparatives

Enfin, au troisième niveau de l'analyse, trois grilles plus exhaustives peuvent être remplies de façon systématique, en vue de pouvoir comparer les applications entre elles. Ces trois grilles reprennent les composantes des applications dynamiques des temporalités des territoires :

- une grille sur le temps
- une grille sur l'espace

#### - Temps représenté

Différentes échelles de temps peuvent être représentées dans les visualisations : un temps immédiat (sur une période inférieure à la journée), un temps court (de la journée au mois), un temps intermédiaire (de quelques années à quelques dizaines d'années) ou un temps de l'Histoire (supérieur au siècle).

Le Tableau 14 montre que le temps intermédiaire est prévalent (présent dans 43% des applications). En revanche, le temps de l'Histoire est sous représenté (13% des applications). Dans 6% des cas, plusieurs échelles temporelles sont accessibles dans les applications : il s'agit toujours du temps intermédiaire accompagné d'une autre. A lui seul, le temps intermédiaire (de quelques années à dizaines d'années) représente deux-tiers du nombre d'occurrence de toutes les autres échelles réunies. L'échelle de l'année semble en effet être l'échelle de collecte de données la plus fréquente (études démographiques par exemple). Et les études d'observation des dynamiques du territoire n'ont lieu que depuis quelques décennies, ce qui peut expliquer que les visualisations sur le temps de l'Histoire (supérieur au siècle) soient peu rencontrées (12% des applications). Le temps immédiat (inférieur à la journée) et le temps court (de la journée au mois) sont chacun présents dans 25% des applications.

Echelles temporelles	Part dans le corpus
Temps immédiat	25%
Temps court	25%
Temps intermédiaire	43%
Temps de l'Histoire	13%

Tableau 14 : Les échelles temporelles représentées dans le corpus

#### - Espace représenté

Différentes échelles spatiales peuvent également être visualisées : l'échelle locale (du point à l'échelle de la commune), intermédiaire (échelle de la région), globale (du pays au continent) ou mondiale.

Le Tableau 15 met en évidence que la couverture locale (échelle de la commune) est la plus fréquente (représentée dans 47% des applications). Elle représente à elle seule 85% du nombre d'occurrence de toutes les autres échelles spatiales réunies. Si elle prévaut largement, l'échelle d'étude globale (du pays au continent) est assez fréquente également (25% des applications).

Les couvertures spatiales intermédiaire (échelle de la région) et mondiale sont sous-représentées par rapport aux deux autres (chacune présente dans seulement 15% des applications). Les visualisations s'intéressent donc rarement à ces échelles.

Echelles spatiales	Part dans le corpus
Echelle locale	47%
Echelle intermédiaire	15%
Echelle globale	25%
Echelle mondiale	15%

Tableau 15 : Types d'échelles spatiales représentées dans le corpus

#### - Granularité temporelle

La granularité temporelle correspond au pas de temps auquel s'intéresse la visualisation (ex : données visualisables toutes les heures, année par année, ...). La granularité temporelle peut être simple (un seul pas de temps disponible) ou multiple (les données peuvent être visualisées selon plusieurs pas de temps, coexistants ou alternatifs) (Tableau 16).

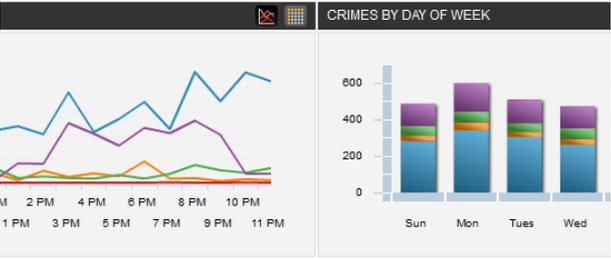
	
<p>Les granularités du jour et de la minute sont toutes les deux visualisées (<i>Ville Vivante Genève</i>)</p>	<p>Statistiques sur les données à la granularité de l'heure et du jour (cartovista, <i>Crime Analysis</i>)</p>

Tableau 16 : Exemples de granularité

La majorité des applications (83%) utilisent une granularité temporelle simple (Tableau 17). La granularité temporelle simple est ainsi presque 5 fois plus représentée que la granularité temporelle multiple. Peut-être la granularité multiple nécessite-t-elle un travail de conception plus poussé. En tous les cas, on peut en conclure que la majorité des applications de géovisualisation intègrent une conception de la dimension temporelle minimaliste, éventuellement au profit d'une réflexion plus grande sur la dimension spatiale, mais passent ainsi à côté de la richesse apportée par l'analyse temporelle.

Type de granularités temporelles	Part dans le corpus
Simple	83%
Multiple	17%

Tableau 17 : Types de granularités temporelles représentées dans le corpus

#### - Granularité spatiale

La granularité spatiale correspond au maillage géographique visualisable, à la taille de l'unité spatiale sur laquelle sont visualisées les données. Tout comme la granularité temporelle, elle peut être simple (une seule échelle de maillage spatial sur le territoire) ou multiple (plusieurs échelles ou plusieurs maillages coexistants ou alternatifs) (Tableau 18)

Le Tableau 19 montre qu'une majorité d'applications (79%) utilise une granularité spatiale simple. Celle-ci est 4 fois plus présente dans les applications que la granularité spatiale multiple. De même que pour la granularité temporelle, la granularité spatiale multiple est peut-être plus compliquée à mettre en place dans une visualisation dynamique, bien qu'elle soit légèrement plus répandue que la granularité temporelle multiple.

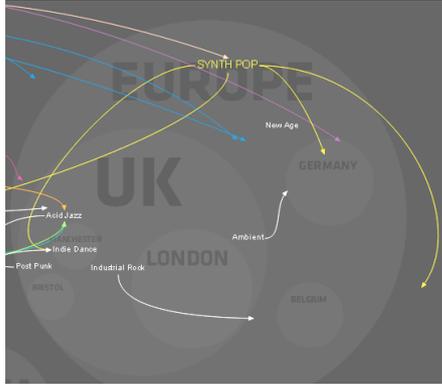
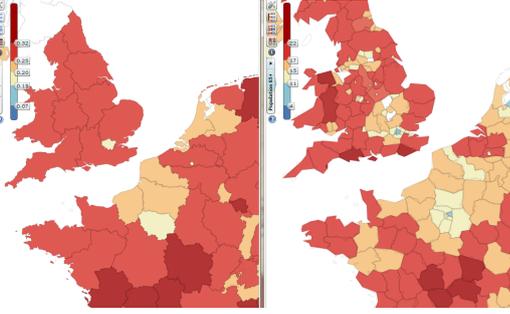
	
<p>Granularité spatiale multiple : localisation d'événements à la fois dans des continents, pays et villes (<i>How music travels</i>)</p>	<p>Plusieurs maillages spatiaux alternatifs de visualisation (<i>OECD Regional eXplorer</i>)</p>

Tableau 18 : exemples de granularité spatiale

Granularités spatiales	Part dans le corpus
Simple	79%
Multiple	19%
Inconnue	2%

Tableau 19 Granularités spatiales représentées dans le corpus

### 4.3. Analyse de la diversité

Comme le montrent les fiches détaillées de l'annexe 1, chaque application a fait l'objet d'une description fine. Treize critères d'analyse ont été présentés dans les deux paragraphes précédents (3 au §4.1 et 10 au §4.2) (Tableau 20). Ces critères principaux ont été retenus en vue de mener une analyse systématique sur le corpus d'applications. Ces critères, extraits des différents niveaux de la grille de lecture, doivent permettre de décrire la variabilité existante dans le corpus d'applications. Il s'agit d'identifier les relations existantes entre eux et de dégager des tendances parmi les visualisations dynamiques de temporalités du territoire.

Environnement interactif
Environnement animé
Lien dynamique avec les données
Dynamiques spatiales
Services rendus
Public visé
Représentation du temps
Représentation de l'espace
Graphiques
Granularité temporelle représentée
Granularité spatiale représentée
temps représenté
Espace représenté

Tableau 20 : ensemble des 13 critères retenus pour analyser conjointement la diversité des applications

La première étape de ce travail a été de tester les relations deux à deux entre les caractéristiques des applications, pour voir s'il y avait des associations systématiques. Nous avons ainsi identifié 7 relations entre critères dans les visualisations du corpus dont nous rendons compte dans le Tableau 21 :

- présence d'animation et service rendu,
- présence d'animation et échelle de temps représentée,
- présence d'animation et échelle d'espace représentée,
- présence d'animation et granularité spatiale,
- présence d'animation et représentation du temps,
- type de dynamique et échelle de temps représentée,
- service rendu et type de public.

Relation	Intensité (R2 ANOVA)	Explicitation
Présence d'animation – Service rendu	54%	- les applications qui rendent un <u>service d'inventaire</u> sont très <i>rarement animées</i> ; - les applications qui rendent un <u>service de récit</u> sont <i>souvent animées</i> .
Présence d'animation – Echelle de temps représentée	55%	- les applications qui présentent un <u>temps de l'Histoire</u> sont <i>plus animées que la moyenne</i> ; - les applications qui présentent un <u>temps immédiat</u> sont <i>moins animées que la moyenne</i> .
Présence d'animation – Echelle d'espace représentée	45% (faible)	- les applications qui présentent un <u>espace intermédiaire</u> ne sont <i>jamais animées</i> ; - les applications qui présentent un <u>espace global ou mondial</u> sont <i>plus animées que la moyenne</i> .
Présence d'animation – Granularité spatiale	30% (faible)	- les applications qui présentent une <u>granularité spatiale multiple</u> sont <i>le plus souvent animées</i> ; - les applications qui présentent une <u>granularité spatiale simple</u> sont <i>le plus souvent non animées</i> .
Présence d'animation - Représentation du temps	88% (très fort)	- les applications <u>animées</u> représentent souvent le temps à <i>la fois par le temps et l'espace</i> ; - les applications <u>non animées</u> représentent souvent le temps <i>par l'espace uniquement</i> .
Type de dynamique – Echelle de temps représentée	59%	- les applications qui présentent des <u>changements états de l'espace</u> sont souvent associées à un <i>temps intermédiaire</i> ; - les applications qui présentent des <u>mobilités</u> sont souvent associées à un <i>temps immédiat ou court</i> ; - les applications qui présentent des <u>changements de forme</u> sont souvent associées au <i>temps de l'Histoire</i> ; - les applications qui présentent <u>à la fois des localisations d'événements ET des mobilités</u> sont souvent associées à un <i>temps immédiat</i> ; - les applications qui présentent à la fois des <u>mobilités ET des flux</u> sont souvent associées à un <i>temps court</i> .
Service rendu – Type de public	54%	- les applications qui proposent un <u>service d'exploration</u> seul s'adressent <i>souvent aux spécialistes</i> et peu souvent au grand public ; - les applications qui proposent un <u>service de récit</u> s'adressent <i>souvent au grand public</i> ; - les applications qui proposent <u>à la fois un service de récit ET d'exploration</u> s'adressent souvent aux deux publics à la fois : <i>grand public ET spécialistes</i> .

Tableau 21 : Relations entre caractéristiques des visualisations

Nous avons ensuite réalisé une analyse multivariée<sup>1</sup> qui nous a permis de définir qu'au-delà des critères dans leur globalité, certaines modalités de ces critères sont liées entre elles. Cela signifie que si une visualisation possède l'une de ces modalités comme caractéristique, il y a de fortes probabilités qu'elle possède aussi l'autre. Les résultats sont présentés dans le Tableau 22.

<sup>1</sup> ACP sur tableau de présence/ absence des différentes modalités

<b>Relation</b>	<b>Explicitation</b>
Type de dynamique - Graphiques	Les applications qui présentent des <u>changements d'état de l'espace</u> intègrent des <i>graphiques atemporels</i> plus souvent que la moyenne.
Type de public - Graphiques	Les applications qui s'adressent à des <u>professionnels et spécialistes</u> intègrent plus de <i>graphiques temporels</i> que la moyenne.
Types de public – Granularité temporelle	Les applications qui utilisent une <i>granularité temporelle multiple</i> s'adressent souvent à des <u>professionnels et spécialistes</u> .
Service rendu – Granularité temporelle	Les applications qui rendent un <u>service de récit</u> utilisent souvent une <i>granularité temporelle simple</i> .
Echelle d'espace - Echelle de temps	Les applications qui présentent un <u>espace intermédiaire</u> ont tendance à représenter également un <i>temps intermédiaire</i> .
Echelle d'espace – Représentation de l'espace	Les applications qui représentent l'espace à une <u>échelle mondiale</u> <i>représentent l'espace par un graphique</i> plus souvent que la moyenne.
Représentation du temps – Représentation de l'espace	Les applications où le <u>temps est représenté par l'attribut des données</u> représentent majoritairement l'espace sous forme de carte
Représentation du temps – Service rendu	Les applications où le <u>temps est représenté par l'espace</u> remplissent plus que la moyenne un <i>service de prédiction ou prospective</i> .
Type de dynamique - Service rendu	Les applications qui présentent des <u>localisations d'événements</u> remplissent aussi souvent un <i>service d'inventaire</i> .
Type de dynamique - Echelle d'espace - Interactivité	Les applications qui présentent une <u>dynamique d'état de l'espace</u> s'attachent plus que la moyenne à un <i>espace mondial</i> et sont souvent <i>interactives</i> .

Tableau 22: Corrélations entre modalités des critères descriptifs des visualisations

Afin de dégager des groupes ou des tendances parmi les visualisations dynamiques des temporalités des territoires, nous avons réalisé une classification (CAH) sur la base des critères descriptifs retenus.

Les résultats permettent de classer les visualisations en 9 types d'applications (G1 à G9), qui regroupent chacun de 3 à 10 applications. Les critères qui expriment la diversité de ces groupes sont représentés dans le Tableau 23.

	Critères											
Types	Animé	Lien données	Dynamique	Service	Public	Graphiques	Visu Temps	Visu Espace	Echelle Temps	Echelle Espace	Grain Temps	Grain Espace
G1	non	oui	Mobilités, localisation	présentation / prédiction	Grand public	peu	attribut	sémiotique	<u>immédiat</u>	<u>local</u>	simple	simple
G2	non				<u>Spécialistes</u>				<u>Intermédiaire</u>	<u>Intermédiaire</u>		
G3	oui		<u>Flux, mobilités</u>				<u>temps</u>		court	<u>local</u>		
G4	oui	non	Forme	<u>récits</u>	Grand public	peu	temps	sémiotique	historique	global, mondial		<u>multiple</u>
G5	oui	oui	Etat	<u>exploration</u>		majorité Atemporels	temps		Intermédiaire	<u>global</u>		<u>multiple</u>
G6		oui		présentation, exploration					<u>court</u>	local	<u>multiple</u>	multiple
G7		oui	Etat	exploration	Spécialistes			sémiotique	court, intermédiaire	<u>local</u>	<u>multiple</u>	simple
G8	oui		Etat	<u>récit</u>	Grand public		temps			<u>global</u>	simple	simple
G9	oui		Etat	exploration	Grand public	majorité Atemporels	temps	graphique		<u>mondial</u>	simple	simple

(Légende : les cases vides signifient que le critère n'est pas une caractéristique du groupe, sinon la modalité la plus représentative est signalée – les modalités **soulignées** sont celles qui distinguent ce groupe des autres – les couleurs n'ont pas de signification particulière et servent juste à distinguer plus facilement les modalités des variables)

Tableau 23 : Caractéristiques discriminantes des groupes de visualisations analysées

On peut ainsi identifier des catégories fines d'applications parmi les productions web qui représentent des temporalités territoriales. Le Tableau 24 présente ces types ainsi que les applications qu'ils concernent.

	<b>Intitulé</b>	<b>Applications concernées</b>
G1	<b>Présentations statiques de données de localisations et de mobilités à grande échelle</b>	1)Bostonography, 2)Isokron, 3)Marine Traffic, 4)Mega-Commuters Take Manhattan, 5)Photographer's ephemeris, 6)Quick route, 7)ReRouteMe, 8)TubeMap London, 9)Wind Maps, 10)Yosemite Park Hiking Map
G2	<b>Visualisations statiques à échelle intermédiaire destinées aux spécialistes</b>	1)2001 vs 2011 Census, 2)American Migration, 3)FlowMap, 4)Gruben Glacier, 5)HerbariaViz, 6)InstantAtlas, 7)IRSN Mesure de la Radioactivité, 8)JflowMap, 9)Newspaper accross the US, 10)Simulateur climatique Météo France
G3	<b>Visualisations animées de flux et de mobilités à grande échelle</b>	1)Bike Share Map, 2)Commuting Scales, 3)MATSim, 4)MIRO, 5)STEM gis Animations, 6)Ville Vivante
G4	<b>Récits historiques animés à l'échelle mondiale, à destination du grand public</b>	1)How music travels, 2)The centennia historical atlas, 3)TimeMap
G5	<b>Visualisations exploratoires animées à une échelle globale</b>	1)Datar, 2)OECD eXplorer, 3)Visualizing emancipation, 4)Voting America
G6	<b>Visualisation de présentation et d'exploration sur une échelle locale et un temps court, à granularité temporelle multiple</b>	1)Crime Analysis, 2)CrimeViz, 3)1 mois de Vélib
G7	<b>Visualisations exploratoires de changement d'état de l'espace à une échelle locale, à granularité temporelle multiple</b>	1)City of Melbourne, 2)Data rose, 3)Treemaps, 4)Wakame
G8	<b>Présentations de récits animés de changements d'état de l'espace, destinées au grand public</b>	1)Ageing and the UK, 2)Animeye, 3)Sars Epidemic, 4)Statistik Austria
G9	<b>Visualisations exploratoires animées de changement d'état de l'espace à l'échelle mondiale, destinées au grand public</b>	1)Atlas INED, 2)Global Peace Index, 3)Small arms and ammunitions

Tableau 24 : Intitulé des groupes et applications de visualisation de dynamiques concernées

En conclusion, 13 critères ont été identifiés comme étant d'intérêt pour analyser la diversité des visualisations dynamiques des temporalités des territoires. Les analyses réalisées

permettent de mettre en évidence certains modes de représentation de l'information sous-utilisés actuellement (tels que le lien dynamique avec les données, les granularités spatiale et temporelles multiples, les graphiques associés à la carte), alors qu'ils apporteraient une richesse importante aux visualisations. Ils montrent également que certains types de dynamiques territoriales sont moins visualisés que les autres (en particulier les dynamiques qui entraînent des changements de forme d'objets spatiaux et les flux).

L'analyse permet d'identifier 9 catégories de visualisations dynamiques des temporalités des territoires, grâce au panel d'applications sélectionnées dans le corpus. Ces 9 types sont a priori représentatifs de la majorité de la production sur le web. Ces catégories se distinguent chacune par un ou plusieurs indicateurs.

Dans les applications actuelles, certains de ces critères sont souvent représentés conjointement. Cela met en évidence les tendances actuelles dans la conception de visualisations dynamiques des temporalités territoriales, mais souligne aussi les zones de vide en montrant que certains indicateurs sont rarement associés alors qu'ils ne paraissent pas exclusifs. La prise en compte de ces associations entre indicateurs pourrait permettre d'élaborer de nouveaux modes de visualisation, innovants, qui enrichiraient la diversité des applications.

## 5. Réflexions sur les enseignements et perspectives

L'analyse de la variété des visualisations dynamiques et les discussions tenues lors du séminaire du 5 février 2014 au PUCA permettent de dégager un certain nombre de questions en suspens quant aux représentations des dynamiques territoriales. Le séminaire avait pour but de rassembler un certain nombre de spécialistes afin d'éclairer certains des enjeux futurs liés à la question de la représentation dynamiques des temporalités des territoires. Le programme s'articulait autour des questions suivantes :

- Quels legs méthodologiques ? Quelles réutilisations ?
- Comment la cartographie et la sémiologie graphique viennent enrichir les représentations des dynamiques des territoires ?
- Quelles innovations sont liées aux données sur les mobilités, qui constituent aujourd'hui une des sources importante des nouvelles données et qui se justifie par la croissance du phénomène de mobilité qui est au cœur de beaucoup de questionnements ?
- Quels enseignements peut on tirer des pratiques de simulations ?
- Quels sont les nouveaux enjeux associés aux pratiques participatives et aux données ainsi constituées ?

Nous synthétisons ici les différentes présentations et discussions de cette journée.

### 5.1. Le paramètre temps, un grand absent

L'étude que nous avons réalisée a souligné clairement un déséquilibre net entre attention portée au paramètre espace et attention portée au paramètre temps. Ce dernier est souvent réduit à une sorte de « portion congrue » - un attribut secondaire, vu comme simple. Cela se traduit par des *a priori* presque systématiques (temps vu comme linéaire, discret, ancré, à granularité simple), limitant très largement la portée informationnelle des données mobilisées et notre capacité à les analyser de façon innovante. Pour comprendre et interpréter de façon renouvelée, à fins décisionnelles, une dynamique spatiale, il paraît indispensable d'élargir l'éventail de solutions offertes à l'analyste en matière de modélisation et de représentation du paramètre temps, en répondant par exemple aux questions suivantes :

- Si le temps est une variable multidimensionnelle, alors quelles sont les dimensions du paramètre temps à prendre en compte pour analyser une dynamique spatiale à l'échelle du territoire ?
- Quelles sont aujourd'hui les définitions et classifications opérationnelles permettant de rendre compte de la multi-dimensionnalité du paramètre temps ?
- Quels sont les services spécifiques à attendre de la modélisation et de la représentation des différentes dimensions du paramètre temps (par exemple, mise en évidence de récurrences, impact du modèle temps discret sur la restitution d'une transformation, apport du raisonnement en temps ordinal, etc.)
- Puisque les jeux de données produits intègrent aujourd'hui des temporalités de plus en plus hétérogènes, comment faire du paramètre temps un paramètre incluant la notion de multi-granularité temporelle ?

- Comment doivent être prises en comptes les temporalités longues, comment rendre comptes des problèmes spécifiques que pose l'étude d'évolutions se déroulant dans le temps de l'Histoire, avec ce que cela implique « d'imperfections » dans les données disponibles ? Comment rendre compatibles et mutuellement enrichissantes l'observation de temporalités courtes, pour lesquelles le retour d'expérience est possible, et des temporalités longues, pour lesquelles on cherche à densifier un état de connaissance ?
- Quels sont les apports respectifs des solutions représentant le temps par de l'espace (frises, curseurs, roues, etc.) et des solutions représentant le temps par du temps (animations) ?

## 5.2. Des données massives, mais quelle qualité de données ?

Avec notamment l'émergence de solutions dites « collaboratives », et des dispositifs de suivi temps réel (transports en commun, ou téléphonie mobile par exemple) la quantité de données spatialisables croît de façon significative. Les masses de données, que les systèmes de collecte en temps réel génèrent, posent en réalité des problèmes d'interprétation considérables, imposant de rechercher de nouvelles modalités de réduction dimensionnelle, de sérialisation, de classes de valeurs, questions appelées à devenir de plus en plus prégnantes dans les années à venir. Par ailleurs certaines de ces données, en particulier les données issues de démarches collaboratives, posent des problèmes de fiabilité significatifs. Autrement dit, le jeu de données spatiales certes s'enrichit, avec plus de précisions spatiales et temporelles, mais avec cette croissance plusieurs familles de questions émergent :

- Face à des modalités d'extraction de données fortement hétérogènes, comment rendre compte de façon lisible et analysable des spécificités de telle ou telle donnée, de tel ou tel jeu de données, en terme de crédibilité, de vérifiabilité, de cohérence, de portée spatiale et temporelle ?
- Quels outils d'analyse (quels modèles, quels outils visuels) développer face à des masses de données pour lesquelles les réponses exclusivement cartographiques sont manifestement mal adaptées ? Quels mécanismes de simplification / regroupement / prétraitement mettre en œuvre sans perte de sens ?
- Quels protocoles définir pour réaliser des collectes des données plus adaptées aux représentations dynamiques des temporalités des territoires, en particulier dans leurs dimensions temporelles ?

## 5.3. Modalité de représentation : un enjeu interdisciplinaire

Cette étude a notamment permis de mettre en évidence les rapports existants ou ayant existé entre la cartographie stricto sensu – entrée souvent privilégiée pour analyser une dynamique spatiale – et le champ de la visualisation d'informations, où la formalisation de la dimension temporelle et le recours à l'abstraction apportent un contrepoint utile. Au-delà, les expériences rapportées et les constats que nous avons mis en évidence, soulignent la nécessité grandissante de s'inscrire dans une logique d'interdisciplinarité pour dépasser les verrous existants, et faire face avec pragmatisme aux complexités nouvelles (données

massives, hétérogènes, non vérifiables, multi-supports, temps réel, etc.). Plusieurs pistes sont aujourd'hui à explorer pour renouveler et étendre les pratiques graphiques dominantes :

- La multiplication des types de données géolocalisées, ou encore l'émergence de plateformes 3D ou pseudo-3D par exemple, posent avec une acuité nouvelle la question de la gestion des échelles : quelle représentation multiscalaire face à des données dont l'éventail d'échelles s'élargit ?
- A l'heure où des pratiques sociales inédites – réseaux sociaux typiquement – transforment notre relation à un territoire, à des proximités et où les jeux d'emboîtements simples ne traduisent plus un découpage territorial univoque, comment poser les bases d'une *multi-représentation* du territoire, diverse mais cohérente et interopérable ?
- Bien que certaines dimensions aient été largement analysées, comment mettre en place des règles de sémiologie graphique animée exhaustives et adaptées aux informations spatio-temporelles et aux technologies numériques dans toutes leurs dimensions ?

#### 5.4. Intégrer la troisième dimension : des enjeux à explorer

De nombreuses solutions de manipulation de la donnée spatiale ou spatio-temporelle tentent aujourd'hui d'intégrer la donnée 3D à la fois en amont (acquisition) et en aval (représentation, interfaces). Cette intégration n'est pas sans poser des problèmes sérieux, tant technologiques que méthodologiques, encore largement inexplorés :

- Comment gérer de façon lisible le contraste de définition (résolution spatiale, niveaux de détails) entre une information géographique fine et une volumétrie 3D (notamment du bâti) souvent approchée, voire simulée ? Comment ne pas introduire un biais de lecture en mélangeant une logique de localisation et d'explicitation géométrique relevant de la cartographie, et une logique d'expression des volumes relevant du jeu vidéo ?
- Sur quelles variables graphiques (au sens de J. Bertin) appuyer la production de représentations 3D, animées ou non ? La cartographie a su s'imposer comme une logique de réduction du réel, et comme une logique de codification visuelle largement partagée. Mais quel équivalent dans le monde de la modélisation géométrique 3D, et comment attendre une compréhension rapide et partagée d'un contenu 3D sans cet effort de réduction et de codification visuelle ?
- Quelle est l'efficacité réelle, en terme de navigabilité, d'une interface 3D, et quelle est la courbe d'apprentissage qui sera imposée à l'utilisateur de ces solutions, qui s'affranchiraient des codes et usages classiques de la cartographie numérique 2D ?

#### 5.5. « Geovisualanalytics » : un nouveau paradigme transdisciplinaire ?

Un constat clair est que les bases de connaissances des paradigmes, théories, concepts de sémiologie, de base de données, de modélisations spatiales et temporelles doivent être réinterrogées pour tenir compte de toutes les dimensions temporelles et de ses

caractérisations. Les nombreuses applications développées soulèvent de plus en plus la question d'une transdisciplinarité.

Notre étude a montré (si besoin était) que représenter des temporalités n'est pas un souci neuf, et que de nombreux enseignements peuvent être tirés en croisant trois grandes familles de pratiques, de legs : chronographie, cartographie, visualisation de données et d'informations (dataviz, infoviz). Les solutions informatiques nous apportent aujourd'hui de la capacité de calcul, des interactions, de la multimodalité, du temps réel, de l'externalisation ouverte – mais avant elles, bien des solutions visuelles, souvent très ingénieuses ont été développées pour raisonner conjointement sur l'espace et le temps, et parfois de façon beaucoup plus efficace et économe. Dans quel cadre pourra être mené un travail de compilation et d'analyse systématique de ces legs, permettant d'une part de réinvestir des concepts encore non exploités dans l'ère numérique, et d'autre part de dépasser des frontières disciplinaires encore trop présentes ?

En mettant en avant le néologisme *geovisualanalytics*, de nombreux travaux montrent qu'une meilleure intégration à l'analyse de dynamiques spatiales des apports de la discipline *infovis* (visualisation d'informations) et de son excroissance *visual analytics*, doit être vu comme un objectif prioritaire, pour faire face à la fois à l'effet de masse des données et à leur nécessaire croisement dans et hors de la dimension spatiale.

## 5.6. Une meilleure diffusion scientifique de l'innovation

Le cloisonnement disciplinaire est également palpable dans la diffusion et la publication des travaux. Il pose la question de la diffusion scientifique des avancées majeures, aussi bien théorique et conceptuelle qu'applicative et technique, de la « Geovisualanalytics » via un support adapté, accessible et transdisciplinaire.

Alors qu'il existe de nombreux blogs et sites web qui relayent des visualisations dynamiques originales, il demeure un vrai manque d'un espace pour fédérer les avancées.

Cet espace scientifique doit être conçu comme une plate-forme collaborative, un webservice d'apprentissage, de communication sur les applications, les modèles et les traitements sous-jacents, afin d'en permettre leur reproductibilité et leur maîtrise dans la lecture et la compréhension des phénomènes observés quel que soit le public visé (signalons au passage qu'un premier pas a été réalisé vers une telle plate-forme d'échange entre disciplines avec la création récente de l'Association Française de Dataviz et de sa plateforme web : <http://www.visualdecision.fr>).

## 6. Bibliographie

- Aigner W., Miksch S., Muller W., Schumann H., Tominski C., 2008, « Visual Methods for Analyzing Time-Oriented Data », IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 14, No. 1, pp 47 – 60
- Andrienko N., Andrienko G., Gatalsky P., 2003, Visual Data Exploration using Space-Time Cube, Proceedings of the 21th International Cartographic Conference (ICC), The International Cartographic Association, Durban 2003
- Andrienko N., Andrienko G., Gatalsky P., 2003, Exploratory spatio-temporal visualization, : an analytical review, Journal of Visual Languages and Computing, 14 2003,pp 503-541
- Andrienko G., Andrienko N., Dykes J., Fabrikant S. I., Wachowicz M. 2008. "Geovisualization of dynamics, movement and change: key issues and developing approaches in visualization research", Information Visualization, 7(3-4):173-180.
- Antoni J-Ph, Klein O. et Moisy S., 2004, « Cartographie interactive et multimédia : vers une aide à la réflexion géographique », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 288, mis en ligne le 21 octobre 2004, consulté le 05 juillet 2014. URL : <http://cybergeo.revues.org/2621> ; DOI : 10.4000/cybergeo.2621
- Arnaud A., Davoine P-A., 2009, Temporal geovisualization in risk area, International Cartography Conference, November 15-21, 2009, Santiago du Chili
- Arnaud A, Davoine P-A, 2009. « Cartographie des temporalités dans le domaine des risques », in le Monde des Cartes. Revue du comité français de cartographie, n°202, décembre 2009. pp. 59-70.
- Banos A, Thevenin Th, 2005 : « La carte animée pour révéler les rythmes urbains », Revue Internationale de Géomatique, Vol 15, n° 1, pp. 11-31
- Bertin J., 1967, La sémiologie graphique. Paris, Gauthiers-Villars, 1967, 431 p
- Blaise JY, Dudek, I. 2011, «Concentric Time: Enabling Context+Focus Visual Analysis of Architectural changes», *Foundations of Intelligent Systems, Sc.Ed.: M. Kryszkiewicz, H. Rybinski, A. Skowron, W. Raś, Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, <http://www.springerlink.com/content/g430m21237g76766/>
- Caron C., Roche S., Larfouilloux J., Hadaya P. (2005), « A New Classification Framework for Urban Geospatial Web Sites », *Cybergeo : European Journal of Geography*
- Cauvin C., Escobar F., Serradj A., 2008, Cartographie thématique: Des voies nouvelles à explorer, coll. IGAT Aspects fondamentaux de l'analyse spatiale, Hermès, Paris, p 320,
- Cheylan J.-P., Lardon S., Mathian H., Sanders L., 1995 « Les problématiques de l'espace et du temps et les SIG », *Revue Internationale de Géomatique*, n° 4, p. 287-305, 1995.
- Claramunt C., Thériault M., 1995, « Managing time in GIS : an event-oriented approach », dans Clifford J., Tuzhilin A. (dir.), *Proceedings of the International Workshop on Temporal Databases : Recent Advances in Temporal Databases*, Springer-Verlag, Zurich, Suisse, p. 23-42, 1995.
- Couclelis H., 1992, « People manipulate objects (but cultivate fields) : beyond the raster-vector debate in GIS », dans Frank A.U., Campari I., Ormentini U. (dir.), *Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space*, Springer Verlag, Berlin, p. 65-77, 1992.
- Cunty C., Mathian H., Groupe Cartomouv , 2011, Cartographier le changement : analyse des pratiques sur le web, Actes du colloque SAGEO 2011.
- Davoine P-A, Moisuc B. Gensel J., 2012, "GenGhis: un environnement pour la génération d'interfaces de visualisation spatio-temporelle", chapitre dans Développements logiciels en géomatique, sous la responsabilité de B. Bucher et F. Le Ber, Hermès, Collection traité IGAT, Hermès, 2012
- Davoine P.-A., Saint-Marc C., Di Muro A., Staudacher T., Villanova-Oliver M., Boissier P., 2012 "Constructions cartographiques pour la caractérisation de l'aléa volcanologique du

- Piton de la Fournaise : Cartographie de séries de données chrono-spatiales”, in Actes Conference Internationale de Géomatique et Analyse Spatiale, SAGEO 2012, Liège (Belgique), 7-9 novembre 2012.
- Davoine P-A, 2014, Contributions Géomatiques pour la Gestion des Risques Naturels, Mémoire d’habilitation à Diriger des Recherches, Université de Grenoble, 2014.
- DiBiase D, MacEachren A. M., Krygier J. B., Reeves C, 1992, . Animation and the Role of Map Design in Scientific Visualization ., Cartography and Geographic Information Science, vol. 19, n° 4, October 1992, p. 201-214.
- Dukaczewski D., 2006. « Entities – Cartographic Method of Selection of Static and Dynamic Variables for Temporal Cartographic Animations ». International Conference on Cartography and GIS, January 2006
- Edsall, R. M., and D. J. Peuquet. 1997. "Graphical query techniques for temporal GIS." ACSM/ASPRS Annual Conference, Seattle, WA, 1997, pp. 182-189.
- Elmqvist N., Riche Y., Henry Riche N. and Fekete J-D., 2010, Mélange: Space Folding for Visual Exploration. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 16(3): 468–483, 2010. (voir aussi <http://www.aviz.fr/>)
- Frihida A., Marceau D. J., Thériault M., 2003, Dimension temporelle et modélisation d'une animation cartographique dans un SIG orienté objet. Revue Internationale de Géomatique 13(1): 107-127.
- Galton A. 2004, « Fields and objects in space, time, and space-time », *Spatial Cognition and Computation*, vol. 4, n° 1, p. 39-68, 2004.
- Galton A., 2004 « Fields and objects in space, time, and space-time », *Spatial Cognition and Computation*, vol. 4, n° 1, p. 39-68, 2004
- Gatalsky P, Andrienko N, Andrienko, 2004, G, Interactive Analysis of Event Data Using Space-Time Cube, Proceedings of the Eighth International Conference on Information Visualisation (IV'04) 1093/9547/04, 2004.
- Hägerstrand T., 1970, « What about people in regional science? », Papers of the Regional Science Association, 24, 1970, p.7-21.
- Hearnshaw, H. M.; D. J. Unwin (Hrsg.): Visualization in Geographic Information Systems. John Wiley & Sons, Chichester, 1994, pp. 243.
- Kaddouri L. 2008, « Réflexion sur la sémiologie graphique animée des flux », Mappemonde, no 89, p. 1-12.
- Kapler T., Wright W. , 2004, , “GeoTime Information Visualization”, INFOVIS '04 Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization IEEE Computer Society Washington, DC, USA 2004
- Kienreich W. 2006, “Information and Knowledge Visualisation: an oblique view”, MIA Journal, Vol. 0, Numb. 1
- Köbben B. et Yama M., 1995. « Evaluating Dynamic Visual Variables ». International Cartographic Association, Escuela Universitaria de Ingeniera Técnica Topografica, Madrid, Spain, August 30 - September 1, 1995, 7p.
- Kraak M-J., Edsall R., MacEachren A-M., 1997, “Cartographic Animation and Legends for Temporal Maps: Exploration and or Interaction”. Proceedings of the 18th International Cartographic Conference, Stockholm, Sweden, 1997, p. 253-260.
- Kraak M-J 2001, Web maps and atlases. In Web cartography : developments and prospects. Taylor and Francis, London, pp 135-140, 2001.

- Kraak M-J, 2003, The space-time cube revisited from a geovisualization perspective, Proceedings of the 21 th International Cartographic Conference (ICC), Durban, South Africa, 10-16 august 2003
- Kraak M-J., 2003, "Geovisualization illustrated", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, 57(6-5), p. 390-399.
- Kraak M-J, Ormeling F, 2003, Cartography, Vizualization of spatial data, second edition, Pearson Education, 2003
- Kraak M-J, Ormeling F, 2010, Cartography, Vizualization of spatial data, third edition, The Guilford Press, 2010
- Kraak M.J., Ormeling F. and F-J., 2011, Cartography: visualization of spatial data. New York, Guildford Press, 2011.
- Kraak M-J., Edsall R., MacEachren A-M., 1997, « Cartographic Animation and Legends for Temporal Maps: Exploration and /or Interaction », dans Proceedings of the 18th International Cartographic Conference, Stockholm, Sweden, p. 253-260. [http://www.geovista.psu.edu/publications/MacEachren/Kraak\\_etal\\_97.PDF](http://www.geovista.psu.edu/publications/MacEachren/Kraak_etal_97.PDF)
- Kwan M.-P., Lee J. 2003, Geovisualization of Human Activity Patterns Using 3 D GIS : A Time-Geographic Approach, in M.F. Goodchild, D.G. Janelle, *Spatially Integrated Social Science : Examples in Best Practice*, Oxford University Press.
- Kwan M-P, 2004, GIS Methods in time-geographic research: Geocomputation and visualization of human activity patterns. *Geografiska Annaler, Series B: Human Geography* 86(4): 267-280, 2004
- Laurini R. Milleret-Raffort F. 1990 *Principles of Geomatic Hypermaps*. 4th International Symposium on Spatial Data Handling. Zurich, 23-27 Juillet 90. Edited by K. BRASSEL. Pp. 642-651
- Le Petit B., Pumain D. (1993, *Temporalités urbaines*, Paris, Anthropos, collection « Villes », 316 p.
- L'Hostis A., 1997, *Images de synthèse pour l'aménagement du territoire : la déformation de l'espace par les réseaux de transport rapide*, Thèse de doctorat en Aménagement de l'espace et Urbanisme, sous la direction de P. Mathis, Université F. Rabelais - Centre d'Etudes Supérieures d'Aménagement, Tours.
- L'Hostis A., 2003, « De l'espace contracté à l'espace chiffonné. Apports de l'animation à la cartographie en relief des distances - temps modifiées par les réseaux de transport rapides », *Revue internationale de géomatique*, vol. 13, n°1, p. 69- 80.
- MacEachren A-M, 1995, *How Maps Work. Representation, Visualization, and Design*, The Guilford Press, 1995.
- MacEachren A-M., 1994, "Time as a cartographic variable", dans *Visualization in Geographic Information Systems*,
- Mennis J.L., Peuquet D.J., Qian L., 2000 « A conceptual framework for incorporating cognitive principles into geographical database representation », *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 14, n° 6, p. 501-520, 2000.
- Ormeling F.J., 1995, "Teaching animation cartography", dans *Proceedings of the Seminar on Teaching Animated Cartography*, Madrid, Spain.
- Peterson M-P., 1994. « Spatial Visualization through Cartographic Animation: Theory and Practice ». *Spatial Visualization through Cartographic Animation: Theory and Practice. Proceedings of Geographic Information Systems / Land Information Systems GIS/LIS (1994)*, pp. 619-628.

- Perterson, M-P., 1999, « Active legends for interactive cartographic animation ». Technical communication, *int. J. Geographical information science*, vol. 13, No. 4, 1999, pp. 375-383.
- Peuquet D.J., 1994, « A conceptual framework for the representation of temporal, dynamics in geographic information systems », *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 84, n° 3, 1994, p. 441-461.
- Renolen A., 2000, « Modelling the real world : conceptual modelling in spatiotemporal information system design », *Transactions in GIS*, vol. 4, n° 1, p. 23-42, 2000
- Rodier X., Saligny L., 2010 « Modélisation des objets historiques selon la fonction, l'espace et le temps pour l'étude des dynamiques urbaines dans la longue durée », *Cybergeo : European Journal of Geography, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques*, 2010, disponible à l'adresse : <http://cybergeo.revues.org/index23175.html>
- Sabol, V., & Scharl, A., 2008, Visualizing temporal-semantic relations in dynamic information landscapes. 11th International Conference on Geographic Information Science AGILE2008 Semantic Web Meets Geospatial Applications Workshop (pp. 1-6). Retrieved from <http://geoanalytics.net/GeoVis08/a15.pdf>
- Saint-Marc C., Davoine P-A, Villanova-Oliver M., 2014, Proposal for methods to map natural historical phenomena: application to volcanic hazard and flood hazard in La Réunion, France, *Journal of Maps*, 2014
- Scharl A., Tochtermann K. (Eds.) 2007, "The Geospatial Web Advanced Information and Knowledge Processing Series 2007", London: Springer
- Ségura L., 2003. « Analyse spatiale et carte animée : construction d'un prototype d'animation des dynamiques démographiques ». *Revue internationale de géomatique*, vol.13, n°1, pp. 93-105.
- Spence R. ,2001, "Information visualization", Addison Wesley ACM Press
- Shneiderman B., Cart S.K., Mackinlay J.D, (1999, , "Readings in Information Visualization: Using Vision to Think", Morgan Kaufmann
- Thevenin T., Chardonnel S., Cochey E. 2007, « Explorer les temporalités urbaines de l'agglomération de Dijon : Une analyse de l'Enquête-Ménage-Déplacement par les programmes d'activités », *Espace populations sociétés*, 2-3
- Tufte E. R., 2001, *The Visual Display of Quantitative Information* (2nd edition 2001), Graphics Press
- Tufte E.R.,1990, "Envisioning information", Graphics Press
- Worboys M.F.1995, « A unified model of spatial and temporal information », *Computer Journal*, vol. 37, n° 1, p. 26-34, 1994
- Worboys M.F., 2005 « Event-oriented approaches to geographic phenomena », *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 19, p. 1-28, 2005.
- YUAN M., 2001, « Representing complex geographic phenomena with both object- and field-like properties », *Cartography and Geographic Information Science*, vol. 28, n° 2, p. 83-96, 2001.

## Tables des figures

Figure 1. Du phénomène à sa représentation : un enchainement d'étapes confrontant modèles et environnements technologiques .....	8
Figure 2. La représentation dynamique de temporalités : des legs méthodologiques à mobiliser .....	14
Figure 3. Confrontation des représentations « orientées espace » et « orientées-temps et données » (période avant 1500) .....	15
Figure 4. Confrontation des représentations « orientées espace » et « orientées-temps » (période 1500-1800).....	16
Figure 5. Confrontation des représentations « orientées espace » et « orientées-temps » (période après1800).....	17
Figure 6. La carte de Minard : une carte emblématique supopt de réflexion méthodologique pour la représentation du temps .....	19
Figure 7. Une application du format visuel « small multiples » dans le contexte d'une évaluation visuelle comparative de différents scénarii d'évolutions en glaciologie (G.Jouvet et al., Numerical simulation of Rhonegletscher from 1874 to 2100, J. Comput. Phys. (2009)).	20
Figure 8. Trois unités graphiques du dispositif de F. Galton, représentant trois jours d'observations. Chaque unité graphique est ici redécoupée verticalement (observations le matin, à midi, le soir) et horizontalement (pression, vent et pluies, température).....	21
Figure 9. Sémiologie graphique et variables visuelles proposées par Bertin (1967) .....	22
Figure 10. Représentation de la trace d'un objet selon Bertin (1967).....	22
Figure 11. Sémiologie graphique pour la représentation du temps dans les cartes selon Vasiliev (Cauvin & al 2008) .....	23
Figure 12 . Le temps à travers le cube spatio-temporel a) d'après Kraak (2003); b) d'après Kuan (2004).....	24
Figure 13. Cube spatio-temporel pour la représentation des évènements : la position verticale représente la date à laquelle s'est produit l'évènement, la taille des cercles représente un attribut thématique tel que l'intensité du séisme (d'après Gatalsky & al, 2004). .....	25
Figure 14. L'horaire de train d'E.J Marey (1885) source : E.R Tufte (1990) .....	26
Figure 15. Carte animée 3D pour révéler les temporalités (Banos & al, 2005).....	29
Figure 16. Données mises en œuvre dans Boyandin, Bertini, Lalanne (2012) - analyse de flux migratoires appuyée (bas) sur une animation et (haut) sur une série type « small multiples » .....	30
Figure 17. Variables animées et représentation des temporalités (d'après Arnaud & al, 2009) .....	31
Figure 18. De la Triade de Peuquet à la géovisualisation (d'après Kraak, 2011). .....	33
Figure 19. Multifenêtrage et synchronisation dans les interfaces de géovisualisation (d'après Kraak, 2010).....	35
Figure 20. Fonctionnement d'une interface de géovisualisation : l'exemple de GenGHIS (Davoine & al, 2012).....	36

Figure 21. Barre de défilement utilisé pour la gestion de la carte animée représentant l'historique des coulées de lave du Piton de la Fournaise de 1972 à 2011 (Davoine, 2014).	37
Figure 22. Exemples de légende temporelle (Edsall and Peuquet, 1997).	38
Figure 23. Exemple de diagramme temporel utilisé dans l'application SPHERE. Le défilement s'effectue par année ou par période (Davoine, 2014)	38
Figure 24. Proposition pour la prise en compte de l'espacement temporel dans une interface de géovisualisation. L'exemple des éruptions du Piton de la Fournaise (Saint-Marc & al, 2013).	38
Figure 25. Géovisualisation au prisme de 3 dimensions (MacEachren, 1994)	40
Figure 26 : Le corpus analysé relativement au référentiel proposé par MacEachren (1994)	44

## Table des tableaux

Tableau 1. Pertinence des variables visuelles dans des cartes dynamiques (d'après Kobben et al 1995 ; Dukaczewski 2006) .....	31
Tableau 2. Outils de l'interactivité et services rendus (Davoine, 2014). .....	39
Tableau 3. Répartition des applications du corpus selon les trois critères de MacEachren (1994) .....	43
Tableau 4 : types de dynamique spatiales .....	45
Tableau 5 : Les types de dynamiques représentées .....	45
Tableau 6: Types de services rendus .....	46
Tableau 7 : Les types de services rendus .....	46
Tableau 8: type de public visé .....	47
Tableau 9:Types de représentation du temps .....	47
Tableau 10:Différents exemples de représentations du temps .....	48
Tableau 11 : types de représentation de l'espace (source : Treemaps House Prices).....	49
Tableau 12 : Les types de graphiques dans les applications du corpus .....	49
Tableau 13:Exemples de types de graphiques dans les applications du corpus .....	50
Tableau 14 : Les échelles temporelles représentées dans le corpus .....	51
Tableau 15 : Types d'échelles spatiales représentées dans le corpus .....	51
Tableau 16 : Exemples de granularité .....	52
Tableau 17 : Types de granularités temporelles représentées dans le corpus.....	52
Tableau 18 : exemples de granularité spatiale .....	53
Tableau 19 Granularités spatiales représentées dans le corpus .....	53
Tableau 20 : ensemble des 13 critères retenus pour analyser conjointement la diversité des applications .....	53
Tableau 21 : Relations entre caractéristiques des visualisations.....	55
Tableau 22: Corrélations entre modalités des critères descriptifs des visualisations .....	56
Tableau 23 : Caractéristiques discriminantes des groupes de visualisations analysées.....	57
Tableau 24 : Intitulé des groupes et applications de visualisation de dynamiques concernées .....	58