
Champs et objets pour mieux représenter les phénomènes dans leur contexte géographique

Anne Ruas, Ha Pham, Laura Pinson

COSYS-LISIS, univ. Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-77447 Marne la Vallée, France
Anne.ruas@univ-eiffel.fr

RÉSUMÉ. De nombreuses études et recherches visent à mieux connaître les phénomènes de type pollution ou météo. Les champs de valeur représentant ces phénomènes peuvent être visualisés sur des outils de visualisation scientifiques qui ne disposent pas de la richesse de symbolisation propre aux SIGs, notamment pour le géoréférencement et pour la représentation des objets vectoriels décrivant l'espace support. La représentation sous forme raster sur SIG est possible mais limitée. Pourtant au niveau scientifique il est important de pouvoir co-visualiser les champs dans leur contexte géographique pour mieux les analyser et faire des hypothèses sur les interactions entre un phénomène et l'espace support. Dans ce papier nous proposons de créer des objets graphiques spécifiques permettant de visualiser des champs de valeur à différents niveaux de détail et sur différents objets de l'espace support. Les objets graphiques de type plan mettent en valeur la continuité du phénomène et se voient par transparence avec les autres objets alors que les objets de type grille permettent de voir le champ et les autres objets décrivant l'espace. Les données peuvent aussi être projetées sur des objets vectoriels particuliers de l'espace support. Nous proposons également d'utiliser des symboles surfaciques et non ponctuels afin de mieux résister aux opérations de zoom et de dézoom. Nous proposons un modèle de données dédié à la représentation graphique des données de type phénomène que nous illustrons à partir de données décrivant un flux et une pollution dans une canalisation d'eau et des données météorologiques urbaines. Dans ce papier nous ne traitons pas de la représentation de la dynamique en tant que tel mais nous proposons une meilleure représentation graphique de chaque état décrivant un phénomène.

ABSTRACT. Many studies and research aim at better knowing phenomena such as pollution or climate. The fields of value representing these phenomena can be visualized on scientific visualization tools which do not have the richness of symbolization specific to the GIS, in particular for the georeferencing and for the representation of the vector objects describing the geographical context. The representation in raster on GIS is possible but limited. However, at the scientific level, it is important to be able to co-visualize the fields describing phenomena in their geographical context to better analyze them and make assumptions about the interactions between a phenomenon and the geographical space. In this paper we propose to create specific graphical objects allowing visualizing fields of values at different levels of detail and on different geographical objects. Planar graphic objects emphasize the continuity of the phenomenon and are seen by transparency with the other objects whereas the grid types make it possible to see the field and the other geographical objects describing the space. The data can also be projected on particular geographical vector objects. We also propose to create aerial graphical objects in order to improve zoom in and out efficiency. We propose a data model dedicated to the graphical representation of phenomena data type that we illustrate from data describing flow and pollution

in a water pipeline and urban climate data. In this paper we do not deal with the representation of dynamics but with the best graphical representation of each state describing a phenomenon.

MOTS-CLÉS : cartographie, phénomène, champ de valeur, généralisation, niveau de détail raster-vecteur, pollution, météorologie, exploration de données géographiques.

KEYWORDS: mapping, phenomena, field, generalisation, level of detail, raster-vector, pollution, climate, geodata exploration.

DOI: [10.3166/rig.2019.00081](https://doi.org/10.3166/rig.2019.00081) © 2019 Lavoisier

1. Introduction

Représenter l'espace géographique est toujours une gageure. L'espace est d'une grande complexité. Nous le percevons avec nos sens, nos schémas mentaux, nos expertises. Nous n'en percevons qu'une partie, ne serait-ce que pour des questions d'échelles et de sensibilité de nos propres capteurs. Une fois que l'on a défini ce que l'on veut représenter (le quoi), il faut mesurer cet espace pour disposer d'une représentation numérique puis fabriquer des représentations graphiques pertinentes permettant de *donner à voir* cet espace.

Evidemment nous ne mesurons qu'une infime partie, simplifiée, de l'espace. Par exemple nous ne mesurons que le contour des bâtiments, leur hauteur, l'axe des rues. Pour les phénomènes physiques de type champ, dont il sera question dans cet article et que nous définirons ultérieurement, le problème est plus complexe puisque les valeurs de la ou des grandeurs d'intérêt varient dans l'espace et dans le temps. Comme il est impossible de connaître la valeur d'une grandeur en tout point et à tout instant, nous utilisons des mesures physiques en certains points de l'espace et des modèles physiques ou mathématiques qui permettent de couvrir l'espace et le temps avec une certaine granularité spatiale et temporelle. Les résultats de ces modèles sont portés par un réseau de points (TIN ou Grille).

Enfin la représentation cartographique de l'information est l'étape ultime. Elle permet de penser l'espace, d'émettre des hypothèses sur les causes, conséquences et interactions entre les composants. Deux processus sont fondamentaux pour fabriquer des représentations cartographiques lisibles et interprétables : la *généralisation* qui permet d'obtenir une densité d'information et une géométrie des objets graphiques adaptées à l'échelle de représentation et la *symbolisation* permettant de faciliter l'interprétation des symboles représentés. Dans ce papier, nous proposons des solutions pour la représentation cartographique de phénomènes de type champ, co-visualisés avec d'autres objets pour aider à leur analyse.

Si des outils logiciels dédiés existent aujourd'hui pour représenter des champs de valeur (tels que Paraview ou Ensign), ils sont utilisés par les scientifiques experts de ces phénomènes (physiciens, chimistes, mathématiciens, météorologues) pour représenter et explorer les champs étudiés mais pas pour les représenter dans leur contexte géographique. Pour la communication grand public de nombreux sites web existent pour proposer une représentation de champs qui recouvrent, par transparence, l'espace support. On citera par

exemple les sites des associations agréées de Surveillance de la qualité de l'air tels que celui de la région Auvergne Rhône-Alpes ou celui de la région Île-de-France (<https://www.atmo-auvergnerhonealpes.fr/> ou <https://www.airparif.asso.fr/indices/horair>). Ces solutions web sont très intéressantes mais la superposition par transparence limite la visibilité des objets graphiques en fond de plan. Pour compléter ce type de représentation par transparence, nous souhaitons proposer des représentations cartographiques supplémentaires qui permettent de représenter les données de type champ au milieu d'entités dites continues ou pérennes, à géométrie généralement bien définie (*bona fide*) et représentées sous forme vectorielle. Ce type de représentation est destiné aux études contextuelles, typiquement mais non exclusivement à des géographes ou urbanistes.

Selon la nature du phénomène et selon l'étape d'exploration des données, nous souhaitons pouvoir représenter le champ de valeur soit en superposition comme on le trouve sur les SIG ou sites web, soit sous la forme de points symbolisés, soit sur les objets supports, c'est-à-dire en utilisant la géométrie de certains objets. Cela nécessite de construire un support de représentation graphique des champs à partir de la géométrie de certains objets support. Le but de cet article est donc de proposer des nouvelles solutions pour la représentation cartographique des phénomènes représentés par des champs de valeur – tels que l'écoulement d'eau ou des champs de température – pour faciliter leur interprétation contextualisée.

Nous nous plaçons dans le champ de recherche sur l'exploration de données géographiques (Andrienko et Andrienko, 2006) en nous focalisant sur la co-visualisation de l'information et sur les niveaux de détail et non sur la visualisation de la temporalité et la répétition des événements, comme cela est proposé par le laboratoire Steamer (Davoine *et al.*, 2012 ; Gautier *et al.*, 2016) :

- nous voulons proposer différentes solutions de représentation cartographique des champs de valeur qui seraient mobilisables à la demande pour faciliter l'analyse exploratoire de ces phénomènes,

- même si nous disposons d'une série d'états décrivant un épisode pour un phénomène donné, ce papier est centré sur l'amélioration de la représentation visuelle de chaque état et non sur la représentation de la dynamique du phénomène,

- nous ne traitons pas la représentation graphique de l'imperfection des données décrivant un épisode.

En représentant conjointement des champs de valeur qui varient dans le temps avec des objets pérennes à géométrie bien définie, nous nous positionnons également dans le débat raster-vecteur (Couclelis, 1992) que nous contournerons en créant des structures permettant de représenter les champs de valeur dans un environnement vectoriel ce qui offre l'avantage de représenter les deux types d'entités.

Enfin, nous montrons l'utilisation de ce type de structure dans un environnement 3D, ce qui est important lorsque l'on dispose de données sur différents plans verticaux, ce qui n'est pas souvent le cas actuellement.

Après une rapide présentation des données utilisées dans ces recherches (section 2) nous décrivons les principes de représentation (section 3) puis nous présentons un modèle de données qui facilite la représentation de champs de valeur (section 4). Nous illustrons ces principes sur nos deux cas d'étude : la représentation des flux hydrographiques dans un réseau d'eau et la représentation de températures urbaines (section 5) afin d'illustrer que les représentations proposées peuvent effectivement être utilisées sur des phénomènes de type champ de valeur qui ont des caractéristiques et des implémentations spatiales très différentes.

2. Les cas d'étude utilisés

Pour illustrer notre proposition nous utilisons deux cas d'étude : des données d'écoulement d'eau et des données de météorologie urbaine utilisées dans les thèses de doctorat de Ha Pham (Pham, 2017) et Laura Pinson (Pinson, 2016). Ce sont les complexités à représenter ces données dans le cadre de projets de recherche qui nous ont fait réfléchir à la proposition de nouvelles méthodes de représentation. Les données d'écoulement d'eau que nous utilisons sont constituées de 816 169 points de triangulation qui couvrent l'intérieur d'un réseau d'eau de 2 km de long dans une ville en région parisienne et décrivent un flux d'eau en régime permanent. Une quantité de chlore est injectée à un temps T_0 à un endroit du réseau, et 360 états décrivent la propagation du chlore dans ce réseau. Ainsi, à chaque point sont associés : 1) un vecteur de vitesse de l'écoulement, 2) une pression dont les valeurs sont identiques pour tous les états et 3) une quantité de chlore dont la valeur change pour chaque état. Ces données sont calculées par modélisation directe et inverse par un chercheur de l'IFSTTAR dans le cadre de travaux sur l'usage de la modélisation inverse pour la pollution (Waeytens *et al.*, 2013). La figure 1 montre la granularité initiale du réseau de points et une représentation graphique construite dans le cadre de nos recherches qui associe à chaque nœud un symbole représentant la vitesse d'écoulement.

Les données de météorologie urbaine sont des données calculées dans le cadre du projet de recherche RepExtrem dont le but est de mieux connaître les températures à l'intérieur des bâtiments pendant les canicules en se concentrant sur le centre de Paris. Le modèle SURFEX-TEB (Masson, 2000) a été utilisé par les collègues de Météo France pour calculer un ensemble de grandeurs dont la température moyenne dans la rue et à l'intérieur des bâtiments pour chaque maille de 250 m. Un état est calculé toutes les

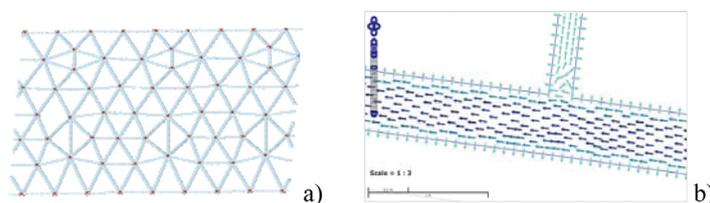


Figure 1. a) Extrait du TIN pour l'écoulement et b) Représentation des vitesses

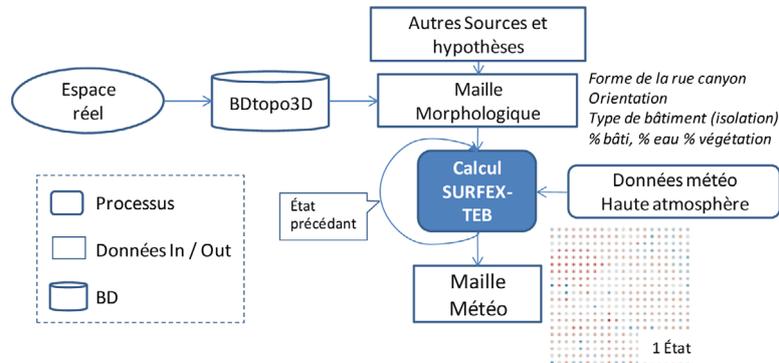


Figure 2. De la maille morphologique à la maille météo

30 mn pour le mois de juillet 2015 à partir de données décrivant la morphologie urbaine, de données météorologiques des couches atmosphériques supérieures et de l'état précédent (figure 2).

Ainsi les données que nous utilisons sont représentées par des champs de valeur. Chaque valeur est associée à un nœud $(x,y,(z))$. Pour les données météo les nœuds sont répartis de façon régulière selon une grille ou un maillage (GRID). Dans le cas du modèle d'écoulement d'eau, les nœuds sont répartis de façon irrégulière provenant d'une triangulation (TIN). Dans les deux cas, les données sont obtenues par des modèles physiques : l'un par un modèle de météorologie basé sur des échanges thermiques (le modèle SURFEX-TEB), l'autre par un modèle d'écoulement d'eau (code Saturne). Ces modèles sont paramétrés grâce à des mesures et utilisent en entrée une représentation simplifiée de l'espace géographique. Le modèle d'écoulement d'eau utilise la géométrie de la canalisation pour limiter la zone d'écoulement. Le modèle de météorologie urbaine utilise une représentation simplifiée de l'espace en discrétisant l'espace en *maille morphologique* et en comptant les proportions, tailles et orientations des immeubles pour chaque nœud de la maille pour en déduire les échanges thermiques dans et entre chaque maille. En sortie, ce modèle produit des données météorologiques attachées à chaque nœud d'une grille, appelé *maille météo* (figure 2). Il s'agit pour nous du *champ de valeur initial* que nous souhaitons cartographier de différentes façons. Nous ne rentrons pas dans le détail du calcul de ces données, notre objectif est de représenter graphiquement au mieux ces données associées aux données décrivant l'espace urbain environnant pour faciliter l'analyse des interactions avec l'environnement. L'utilisation de ces deux jeux de données nous permet d'étudier des cas très différents : dans le premier cas les données sont très denses, et les distances toutes petites (quelques centimètres puisque le flux est à l'intérieur d'une canalisation de quelques dizaines de centimètres de diamètre) alors que pour le second cas, à l'inverse, les données sont très éparpillées puisqu'il y a un point tous les 250 m et elles couvrent tout l'espace. Ces deux cas nous permettent de généraliser nos propositions pour différents types de champ de valeur à représenter.

3. Notre approche pour la représentation contextualisée de champs de valeur

3.1. Définitions des phénomènes, champs, épisodes et espace

Dans cette partie nous expliquons le sens que nous donnons dans le cadre de ce travail pour les termes Phénomène, Champ, Épisode et Espace, afin de faciliter la compréhension de la suite du papier.

Le mot phénomène vient du grec *Phainomena*, « ce qui apparaît » ou « ce qui se montre ». De nombreuses définitions existent, dans le *Larousse* il est défini comme un « Fait naturel constaté, susceptible d'étude scientifique, et pouvant devenir un sujet d'expérience » et aussi comme un « Fait observé, en particulier dans son déroulement ou comme manifestation de quelque chose d'autre ». Le terme est intéressant parce qu'il porte implicitement l'objet dont il est question et le sujet qui le perçoit. Ainsi un phénomène ne se donne pas directement ou pas entièrement à voir. Sans entrer dans un développement philosophique, le terme phénomène correspond bien à l'expérience scientifique que l'on a lorsque l'on veut décrire de la pollution atmosphérique, un écoulement d'eau ou une vague de chaleur. Le phénomène a lieu, nous n'en percevons et mesurons qu'une partie que nous essayons de comprendre. Un phénomène se déroule, nous le mesurons très partiellement et nous concevons des modèles physiques et informatiques pour le représenter et le reproduire. Parmi les nombreux phénomènes qui existent, nous nous intéressons à ceux qui sont représentés numériquement par des champs de valeur. Ainsi nous utilisons le terme phénomène de façon générique pour souligner le fait que nous pouvons représenter différents types de phénomènes, bien que chaque type de phénomène soit caractérisé par des attributs propres. Les phénomènes dont nous avons étudié la représentation sont l'écoulement d'eau dans un réseau et une canicule. Il s'agit de phénomènes de nature différente, décrits par des grandeurs physiques différentes.

En physique, un *champ* est la donnée, pour chaque point de l'espace-temps, de la valeur d'une ou plusieurs grandeurs physiques. Ainsi un phénomène, à un instant donné, est représenté par un champ de valeur qui couvre un espace sans être attaché à un objet matériel. Si le phénomène existe en tout point de l'espace considéré, par contre, au niveau numérique, le champ manipulé a une certaine résolution ou granularité. Ainsi le phénomène n'est pas représenté dans son intégralité mais par des grilles de point plus ou moins denses où chaque point porte une ou plusieurs valeurs décrivant le phénomène. On distinguera la représentation initiale (construite en amont à partir de mesures et de modèles physiques ou mathématiques¹) d'une représentation que nous construisons pour co-visualiser le phénomène et l'espace support. Nous étudions également ce phénomène dans un espace géométrique et sur une durée limitée. Nous utilisons le terme *Episode* pour limiter dans le temps le phénomène représenté. Le phénomène ne se limite pas à son observation, mais il est observé et représenté sur une étendue spatiale et une durée restreintes et avec une granularité définie. Un épisode est décrit par une série de champs.

1. Pour simplifier nous distinguons les modèles physiques qui reproduisent la dynamique d'un phénomène, tel qu'un modèle d'écoulement d'air, des modèles mathématiques qui interpolent ou extrapolent des valeurs initiales.

Enfin, pour simplifier notre propos nous parlons d'une part, des phénomènes géographiques que nous souhaitons mieux représenter (tels que les écoulements d'eau, la pollution de l'air, les données météorologiques de type température) et d'autre part, de *l'espace géographique* pour décrire le monde géographique dans lequel nous étudions ces phénomènes. C'est un abus de langage, puisque toutes ces entités constituent l'espace géographique. Pour reprendre la terminologie présentée par (Mathian et Sanders, 2014), nous considérons que l'espace géographique est constitué d'entités durantes (ou continuantes, pérennes), alors que les phénomènes dont nous étudions la représentation sont des entités occurrentes (ou perdurantes). Ces entités occurrentes sont difficiles à appréhender, et notre objectif est justement de mieux les donner à voir dans l'espace et dans le temps. La aussi, cette conceptualisation est plus simple que la réalité parce que les entités dites durantes changent et peuvent disparaître mais on les considère durantes dans le cadre de nos analyses. Nous proposons donc une co-visualisation de champs et d'objets (bien définis) pour faciliter l'exploration contextualisée de phénomènes.

3.2. Contextualiser les champs de valeur avec les autres données géographiques

Afin d'expliquer l'existence de plusieurs représentations d'un phénomène, on distingue deux étapes :

- 1) la construction des données qui reproduisent le phénomène et,
- 2) l'analyse *a posteriori* du déroulement, des interactions ou de l'impact du phénomène sur et avec son environnement.

C'est pour cette seconde étape que la contextualisation est intéressante. Ce peut être un même scientifique qui réalise les deux étapes (par exemple un géographe climatologue), ou deux scientifiques différents, un spécialiste de la physique du phénomène (par exemple un météorologue-physicien) et l'autre spécialiste de l'étude des interactions et des impacts (par exemple un géographe). Nous prenons l'exemple des données décrivant le climat urbain lors du projet RepExtrem et faisons des analogies avec le modèle d'écoulement d'eau que nous avons également cartographié.

La [figure 3](#) montre une représentation cartographique classique des données météo par construction d'un carroyage : un plan composé de zones carrées contiguës autour des nœuds où chaque carré est représenté par une couleur en fonction de la valeur du nœud et correspond à la zone géographique utilisée pour calculer la valeur de la grandeur qui sera portée par le nœud. Le plan est superposé par transparence à une orthophotographie pour se repérer visuellement et commencer à réfléchir à l'interprétation des valeurs cartographiées. Nous construisons donc une couche de données composée de polygones de forme carrée qui couvrent l'espace.

Cette représentation du champ de valeur et des données urbaines permet de réfléchir aux interactions notamment entre les objets proches selon le premier principe de la géographie de Tobler (1970) *Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things*. Par exemple une zone rouge apparaît au nord ouest

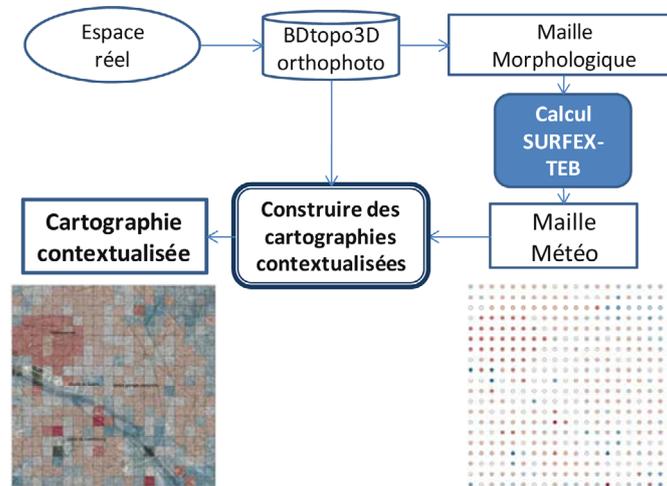


Figure 3. De la maille météo à une représentation cartographique contextualisée de type carroyage, superposée à une orthophoto

correspondant au quartier de l'Opéra à Paris. Pourquoi cette zone est-elle plus chaude que les autres ? À quoi peut être dû ce micro climat ? À une orientation particulière des rues ? À l'absence de végétation dans ce quartier ? À un usage intensif de climatiseurs dans un quartier riche en grands magasins ? À une erreur de paramétrisation du modèle ? Sans donner de réponse aux questions, la contextualisation augmente notre capacité à poser des questions, émettre des hypothèses et interpréter les données calculées.

3.3. Différentier les entités, les objets géographiques et les objets cartographiques

Comme présenté en introduction, une représentation cartographique est construite à partir d'objets géographiques généralisés ou interpolés et symbolisés, eux-mêmes construits par modélisation, saisie et intégration à partir des entités du monde réel (figure 4). Nous utilisons le terme *entité* pour décrire le monde réel tel que nous le percevons et conceptualisons et *objet* pour décrire ses représentations numériques. En suivant la même terminologie que celle utilisée en généralisation (Ruas, 2004), on distingue les objets géographiques des objets cartographiques qui sont des objets destinés à une représentation graphique, c'est-à-dire qu'ils sont construits pour faciliter le processus de compréhension et d'interprétation de l'information à une échelle graphique donnée. La distinction entre objets géographiques et cartographiques permet de bien séparer les données initiales, qui sortent des modèles physiques, de celles qui sont créées pour faciliter la visualisation. Par rapport à une modélisation classique de l'information géographique nous voulons insister sur le fait que symboliser de l'information géographique nécessite la fabrication d'objets supplémentaires dédiés à la visualisation, alors que les objets géographiques sont dédiés aux calculs et au stockage de l'information. Comme il est noté en figure 4 cette construction nécessite de modéliser

l'information ce qui signifie que le modèle de données pour la cartographie sera spécifique et différencié du modèle de données pour le stockage et l'analyse de l'information géographique. On retrouve les deux processus introduits en introduction : l'étape de saisie/intégration (1) puis l'étape de (2) généralisation/extrapolation/symbolisation.

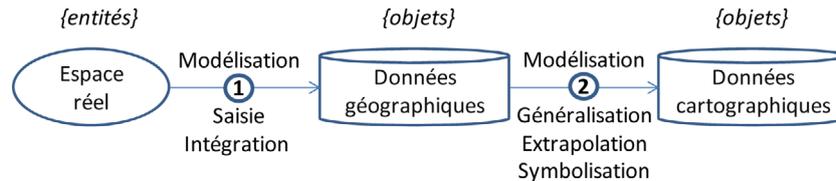


Figure 4. Du monde réel composé d'entités à ses représentations

Dans le cadre de nos travaux de recherche nous proposons donc de créer des objets cartographiques à partir d'objets géographiques décrivant l'espace géographique et certains phénomènes. Pour cela nous présentons ci-après les concepts de niveau de détail et d'espace support que nous utilisons avant de présenter en détail notre modèle de données. Si d'autres travaux ont déjà souligné l'importance de séparer les objets géographiques des objets cartographiques (Duchêne *et al.*, 2011) l'originalité ici est d'étudier le cas particulier des représentations cartographiques des champs de valeur en les co-visualisant avec des données urbaines durantes.

3.4. Construire des représentations pour chaque niveau de détail (LoD)

Sur les sites web les données numériques nous permettent souvent de naviguer entre représentations. En dehors des déplacements de localisation sur l'espace cartographié (à l'aide des flèches nord-sud-est-ouest), les changements de niveaux de zoom sont fréquents. Ils permettent soit d'aller dans le détail de l'information, soit de resituer l'information dans son contexte. Mais une analyse détaillée des processus montre que des simples zooms ou dézooms manquent d'efficacité, c'est pourquoi les sites de cartographie chargent des données cartographiques différentes lors des opérations de zoom et dézoom. La figure 5 montre trois niveaux de zoom consécutifs proposés sur le géoportail de l'IGN. On voit clairement qu'il s'agit de données cartographiques différentes, affichées selon le niveau de zoom demandé.

Pour les données de type champ de valeur décrivant des phénomènes, la situation est identique. Nous proposons donc de préparer les données afin de pouvoir les visualiser au mieux à différents niveaux de détail. Pour cela nous utilisons des méthodes classiques de généralisation ou d'extrapolation. Pour les méthodes de généralisation nous employons des méthodes de type agrégation/clustering : une valeur représente ainsi une zone géographique plus grande, et la valeur de chaque nouveau nœud est calculée en fonction des valeurs initiales de ses voisins. Par défaut la fonction utilisée est une moyenne, mais selon le phénomène étudié on peut choisir d'autres fonctions : par exemple pour la pollution on peut choisir de calculer plutôt la valeur maximum, ou au moins la moyenne du



Figure 5. Trois contenus différents pour trois niveaux de zooms © Geoportail IGN

dernier quartile, par contre si l'objet est de suivre un dépolluant on cherchera au contraire à détecter les valeurs minimales ou par exemple la valeur moyenne du premier quartile. Le but ici est de représenter graphiquement l'information la plus pertinente qui peut être une moyenne, les valeurs les plus fortes ou les plus faibles. Inversement, lorsque les valeurs initiales ne sont pas très denses comme c'est le cas pour les données de météorologie urbaine et que nous souhaitons représenter l'information à grande échelle, nous extrapolons les valeurs sur une structure de points plus dense soit en dupliquant les valeurs sur des points voisins soit en appliquant une répartition linéaire entre valeurs voisines.

Ainsi, nous choisissons de représenter l'information à différents niveaux de détail (figure 6.). Selon le niveau de détail nous utilisons des symbolisations et des espaces supports différenciés. On notera que le maintien de points de repère permettant de ne pas se perdre visuellement entre différents niveaux de détail est important (Dumont *et al.*, 2017). Ainsi dans nos expérimentations, nous conservons la même représentation graphique pour les données de l'espace géographique, seules les données de phénomènes sont généralisées.

Au niveau temporel il faut souvent également procéder à des généralisations pour ne pas avoir trop d'états à visualiser. Dans le cas de la canalisation d'eau nous avons fait une sélection de 18 états équirépartis sur les 360 parce que nous n'avons pas repéré de discontinuités pertinentes dans les données d'écoulement que nous avons. Pour les températures urbaines, les données ont été séparées en cycle nocturne et diurne parce que cela correspond aux critères sanitaires dans le cas des canicules. Pour cela nous avons identifié les plages horaires les plus fraîches et les plus chaudes par analyse de données sur la période étudiée (juillet 2015). Dans ce cas il ne s'agit pas d'un filtrage d'état mais d'une agrégation parce que l'état produit est une moyenne des valeurs d'états consécutifs dans les périodes diurnes ou nocturnes.

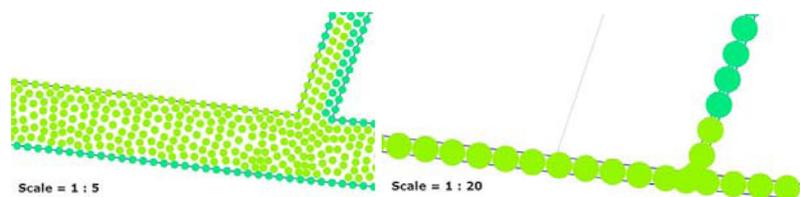


Figure 6. Représentation de la quantité de chlore soit dans la canalisation, soit sur l'axe de la canalisation selon le niveau de détail

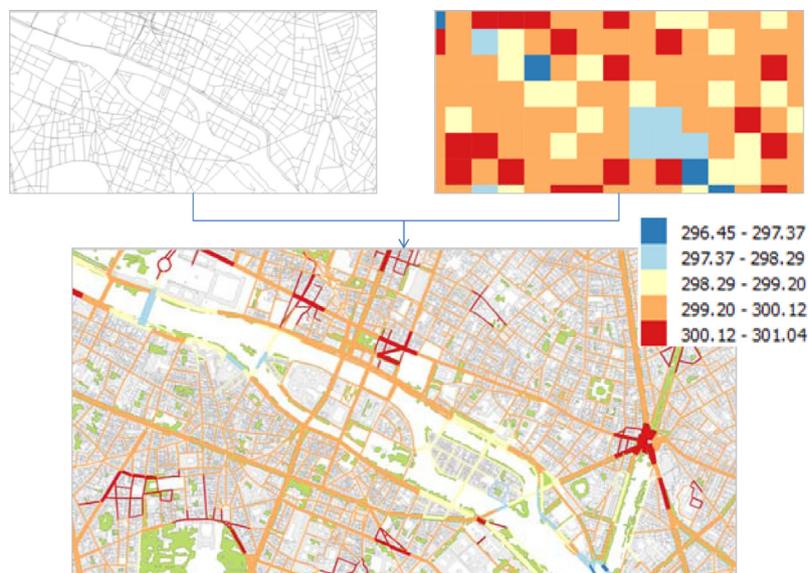


Figure 7. Utilisation des objets 'rues' pour représenter les températures extérieures (données BDtopo et températures en °K calculées par SURFEX-TEB)

3.5. Utiliser l'espace support pour représenter les phénomènes

Pumain et Saint Julien (2010) définissent l'espace support comme un espace contenant dans lequel on situe les objets et on analyse les relations, en opposition à l'espace relatif ou produit qui est vu comme un ensemble de relations entre les objets et les unités spatiales. Dans notre cas, le concept d'espace support est important parce qu'il va permettre de représenter graphiquement les données de phénomène.

Dans le cas des données d'écoulement d'eau dans une canalisation, selon le niveau de détail nous utilisons soit l'intérieur de la canalisation pour montrer les écoulements soit l'axe de la canalisation lorsque le zoom est plus faible. L'espace support est donc la canalisation d'eau qui est utilisée soit comme une surface, en cas de fort zoom (les nœuds sont à l'intérieur de la surface), soit comme un ensemble de segments lorsque le zoom est moyen ou faible. Dans ce cas le symbole représentant la vitesse, la pression ou la quantité de chlore est représenté sur l'axe de la canalisation (figure 6).

Dans le cas de la représentation des températures en ville, nous pouvons soit utiliser tout l'espace (il s'agit de l'espace ambiant) représenté par des nœuds (figure 9), soit projeter la représentation de la température sur la géométrie de certains objets durants. Par exemple, nous pouvons projeter les valeurs des températures extérieures sur les objets routes (figure 7) ou bien la température à l'intérieur des bâtiments sur les objets bâtiments (figure 16). Ainsi en fonction des besoins de visualisation, différents objets de l'espace support peuvent porter les valeurs des données de type champ.

3.6. Utiliser des symbolisations surfaciques et non ponctuelles

Les données de type champ sont au départ associées à des coordonnées ponctuelles (les nœuds des grilles ou des TIN). Dans nos cas d'étude on distingue deux cas :

- soit les données recouvrent tout l'espace dans une certaine étendue : c'est le cas des données de météo ou de pollution atmosphérique ;
- soit les données sont limitées dans un espace contraint : c'est le cas des données d'écoulement incluses dans les canalisations d'eau.

Dans le premier cas (données recouvrant l'espace), on retient trois types de symbolisation efficaces :

- représenter le plan par un carroyage et jouer sur la transparence pour voir les informations géographiques contextuelles. La couleur de chaque carré (polygone) est fonction de la valeur (figure 3),
- représenter les données sur la géométrie d'objets support (figures 7 et 16),

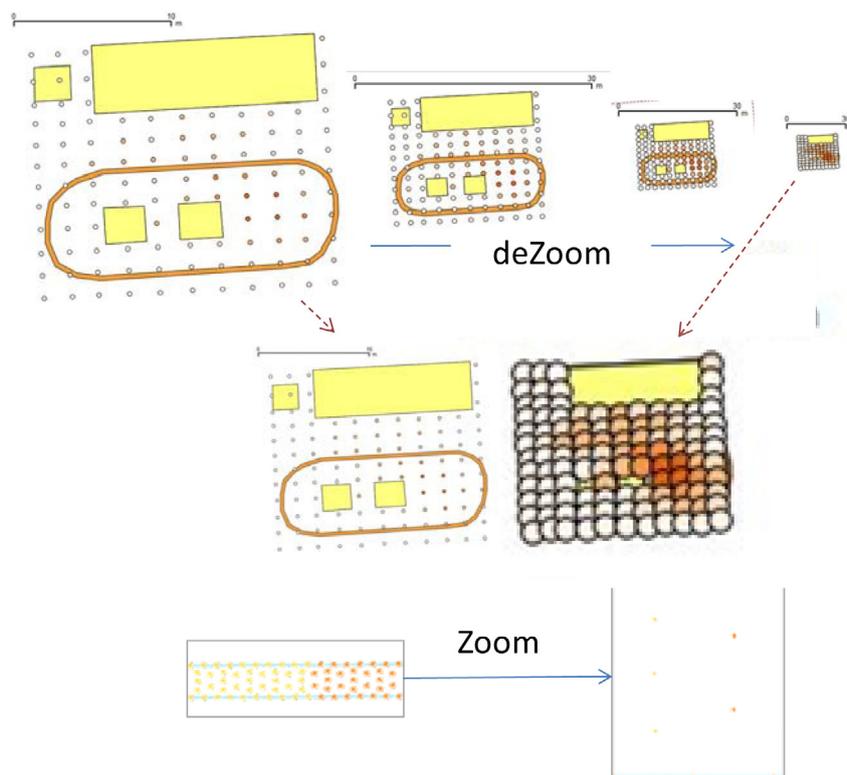


Figure 8. Problèmes de superpositions ou de perte de repère lors de l'utilisation de symboles ponctuels lors d'opérations de déZoom et de zoom

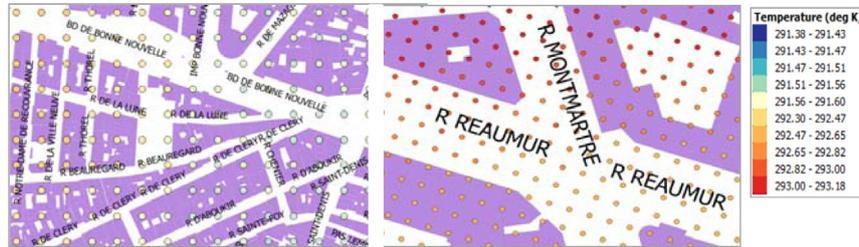


Figure 9. Représentations de la température extérieure sur 2 grilles pour 2 niveaux de détail (LoD 3 gauche et 4 droite), à l'aide de petits symboles surfaciques. Bâti BDTopo et températures en °K calculées par SURFEX-TEB

– représenter les données sur les nœuds. Dans ce cas nous proposons d'utiliser des objets cartographiques surfaciques et non ponctuels. En effet, lors d'opération de zoom ou dézoom les symboles ponctuels conservent toujours la même taille (figure 8) :

- en cas de dézoom les symboles ponctuels étant toujours de la même taille mais la distance entre les nœuds diminuant, les symboles s'intersectent les uns les autres et l'information devient illisible,

- *A contrario*, en cas de zoom la distance à l'écran augmentant entre les nœuds, on perd visuellement l'information.

En utilisant en chaque nœud des symboles surfaciques² au lieu de symboles ponctuels, le symbole suit le zoom. Lorsque l'information n'est plus appropriée on passe alors à une autre source d'information plus détaillée en cas d'un zoom ou plus généralisée en cas de dézoom. En figure 9, même si visuellement on pense qu'il s'agit de symboles ponctuels, ce sont des objets surfaciques de type cercle qui sont utilisés selon une structure géométrique de type grille. Ainsi l'emprise de chaque symbole suit les opérations de zoom ou dézoom, dans une certaine gamme de zooms jusqu'à sauter au niveau de détail inférieur ou supérieur. Les symboles surfaciques n'existant pas, nous créons des objets cartographiques surfaciques qui seront utilisés pour la symbolisation.

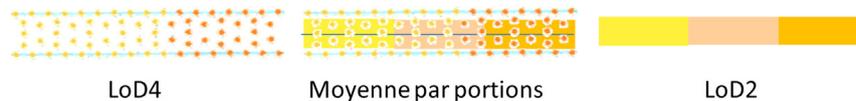


Figure 10. Représentations de la pression par des points intérieurs à la canalisation au niveau de détail LoD4 (le plus détaillé) et LoD2 après généralisation et report sur des polygones centrés sur l'axe de la canalisation

2. Un symbole surfacique a une géométrie surfacique dans laquelle on applique une symbolisation : couleur, texture ou poncif pour l'intérieur de la surface et couleur, largeur et type de trait pour son pourtour.

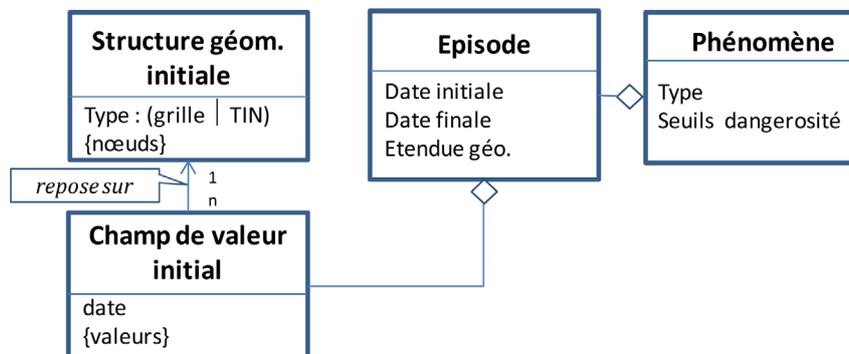


Figure 11. Modèle de données décrivant le phénomène avant symbolisation

Dans le second cas (données associées à une canalisation), lorsque le niveau de détail diminue il n'y a pas assez de place pour représenter l'information dans les canalisations. Dans ce cas l'information est généralisée de façon longitudinale, le long de la canalisation, et la symbolisation est portée par des sections de canalisation. La encore pour que la symbolisation surfacique choisie résiste bien aux opérations de zoom et dézoom ce sont des petits polygones allongés (et non linéaires) et superposés à la canalisation qui portent la symbolisation (figure 10, LoD2). Lorsque le zoom est grand (LoD4) nous utilisons également des objets surfaciques que nous créons, soit en forme de cercle (figure 10, gauche), soit en forme de flèche pour représenter les vitesses (figure 1, droite). Nous créons donc, quel que soit le niveau de zoom, des objets cartographiques surfaciques dédiés à la représentation graphique des données.

Pour pouvoir représenter ces informations, nous proposons un modèle de données *ad hoc*.

4. Modélisation des données

On considère que les données de phénomènes sont décrites de la façon suivante. On analyse un *épisode*, c'est-à-dire un ensemble de champs de valeur entre deux dates, décrivant l'occurrence d'un *phénomène* particulier sur une étendue géographique. Tous les champs de valeur d'un même épisode s'appuient sur une même *structure géométrique* que l'on appelle la *structure géométrique initiale* et qui porte toutes les coordonnées des nœuds de la structure (figure 11).

Pour représenter graphiquement les champs de valeur on utilise un autre modèle de données (figure 13). De nouvelles structures géométriques sont conçues pour la cartographie. Une *structure géométrique pour la cartographie* est composée d'un ensemble de nœuds (pour les grilles), d'un ensemble de polygones (pour la représentation en carroyage) ou d'un ensemble de segments contigus (pour la représentation linéaire dans le cas des canalisations). Ces objets sont construits pour porter les nouvelles symbolisations des champs de valeur (figure 12).

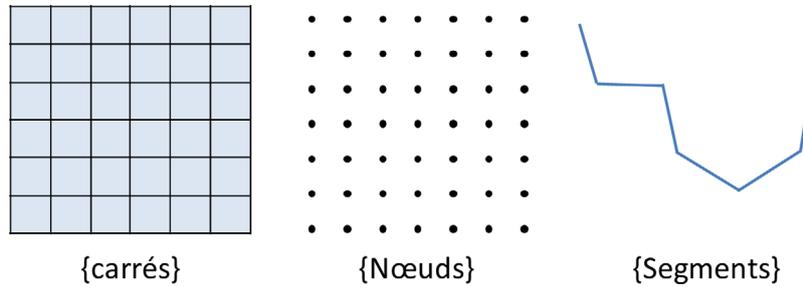


Figure 12. Exemples de structures géométriques pour la cartographie

Ces structures géométriques sont représentées par des *symboles surfaciques* centrés sur les nœuds, le long des segments linéaires ou sur des carrés. La couleur du symbole est fonction de la valeur calculée par généralisation (par filtrage, moyenne, minimale, maximale ou autre) ou extrapolation (répartition linéaire entre valeurs voisines ou duplication).

Chaque nouveau *champ de valeur pour la carto* est calculé par généralisation ou extrapolation à partir du *champ initial* et de la *structure géométrique pour la carto* choisie pour le niveau de détail. Cette structure s'appuie sur un espace support qui peut être l'espace ambiant ou un sous-ensemble spécifique tel que les bâtiments, les rues ou les canalisations dans une étendue géographique spécifique. Un *champ de valeur*

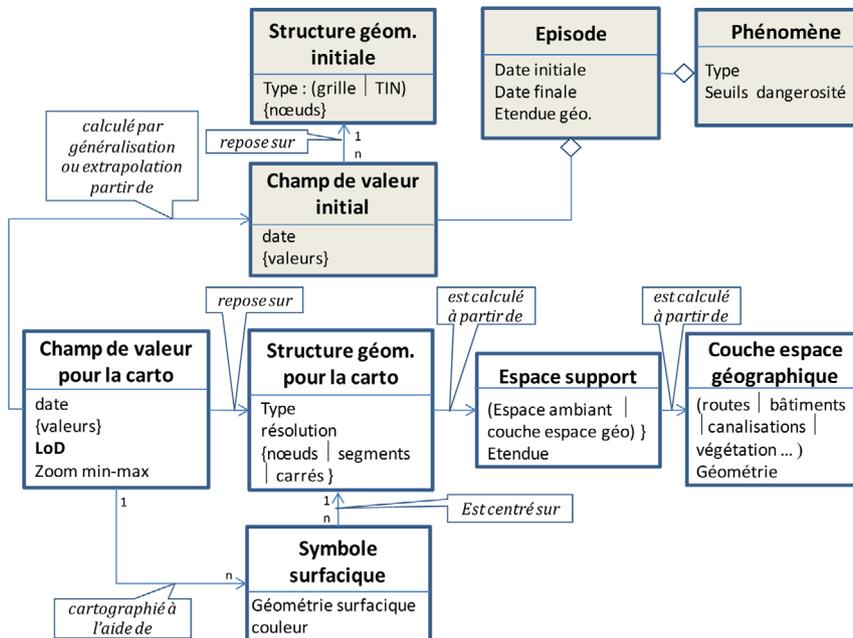


Figure 13. Modèle de données pour la symbolisation des champs de valeur à différents niveaux de détail (LoD)

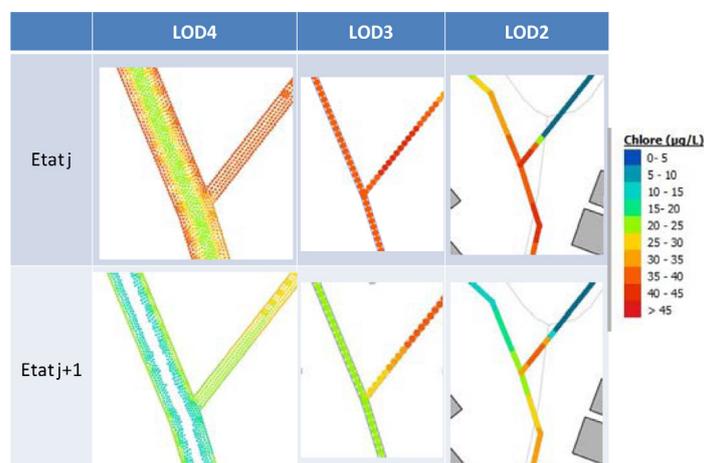


Figure 14. Diffusion de chlore dans la canalisation : 2 états consécutifs à 3 LoD

cartographique possède un niveau de détail spécifique (LoD) et peut s’afficher entre deux niveaux de zoom (zoom min et max). Chaque *structure géométrique pour la cartographie* a une résolution qui correspond à la distance entre les nœuds, la taille des polygones ou la longueur des segments.

5. Mise en œuvre

Ce modèle de données et les principes ont été développés pour faciliter la représentation de données caractérisant la pollution de l’eau et de données météorologiques urbaines.

Si la plupart des développements informatiques ont été faits sur SIG et SGBD, deux sites web ont été conçus pour donner à voir les données et les résultats de nos travaux. Ils sont disponibles sur le site <http://representation-phenomenes.ifsttar.fr/>. Ainsi, postGIS est utilisé pour stocker et manipuler les données de type phénomène et celles décrivant l’espace support, QGIS pour visualiser les résultats en 2D et 3D et créer des fichiers de styles (.sld), GeoServer pour publier des couches cartographiques à partir de données stockées sous PostGIS, OpenLayers pour agréger les couches cartographiques et, les langages HTML, CSS, JavaScript sont utilisés pour créer les interfaces web.

La première application³ permet de rejouer une simulation de flux d’eau dans une canalisation et de visualiser la pression, la vitesse ainsi que la diffusion de chlore en plusieurs états. La [figure 14](#) propose des captures écrans de deux états consécutifs de diffusion du chlore à trois niveaux de détail sur une petite portion du réseau. L’information perçue est très différente selon les niveaux de détail et montre tout l’intérêt de disposer de ces différentes représentations. La représentation des vitesses a

3. <http://representation-phenomenes.ifsttar.fr/assets/eau/eau.html>

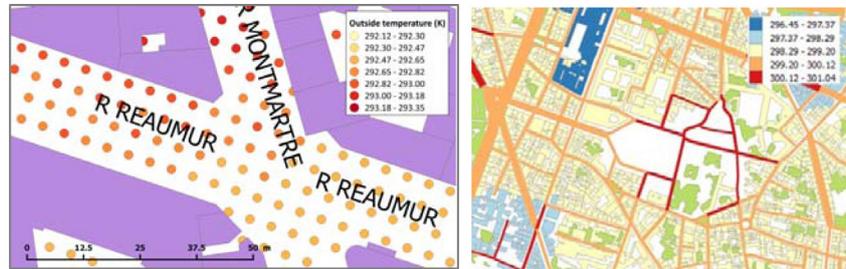


Figure 15. Représentation des températures en grille (gauche) ou projeté sur les bâtiments (températures intérieures) et les rues (températures extérieures). Données BDTopo et Températures calculées en °K par SURFEX-TEB

aussi donné lieu à la construction de symboles surfaciques ayant la forme de flèches dont l'orientation dépend de l'orientation calculée et dont la couleur dépend de la norme de la vitesse (figure 1, image de droite).

Pour les données d'écoulement le nombre de niveaux de détail et les paramètres de résolution associés ont été guidés par les données. Le niveau maximal est celui des données initiales (LoD4 en figure 14). Le niveau suivant (LoD3) correspond à la taille de la largeur réelle de la canalisation la plus large sur l'étendue étudiée. Pour les niveaux inférieurs des expérimentations visuelles ont été réalisées pour déterminer la taille des segments portant les symbolisations surfaciques.

Pour les données météorologiques issues du projet RepExtrem, un autre site a été développé⁴ qui propose une représentation des températures intérieures et extérieures et un indice de dangerosité pour le mois de juillet 2015 sur Paris. La présentation privilégiée pour le site web est une représentation sous la forme de carroyages avec, en fond de plan, les bâtiments de la BDtopo pour se repérer finement. D'autres représentations ont été étudiées et sont illustrées en figure 15, soit sous la forme de grilles orientées localement en fonction de la rue principale, soit sur des objets supports provenant de couches géographiques spécifiques telles que les bâtiments et les rues. La représentation sous la forme d'une grille (figure 15, gauche) offre l'avantage de permettre la visualisation des autres objets support. En figure 15, la grille ne recouvre pas les bâtiments. Son espacement permet de lire le nom des rues et la taille des nœuds permet de porter une couleur nécessaire à l'interprétation des valeurs en chaque nœud. La représentation sur des objets support (figure 15 droite) permet de représenter les températures intérieures sur les bâtiments et extérieures sur les routes et de voir les autres éléments décrivant l'espace environnant tels que la végétation. Ainsi, le choix de l'espace support permet la co-visualisation de plusieurs informations dans un même scénario et de réfléchir aux interactions entre les éléments qui peuplent le territoire.

On peut aussi, lorsqu'on dispose des hauteurs des bâtiments réaliser des vues 3D par extrusion en utilisant, ici, l'API Qgis2threejs (figure 16).

4. <http://representation-phenomenes.ifsttar.fr/assets/canicule/canicule.html>



Figure 16. Représentation 2D et 3D des températures à l'intérieur des bâtiments sur les objets support 'bâtiment'. Données BDTopo et Températures calculées en °K par SURFEX-TEB

Ces représentations 3D mettent en valeur l'effet de maillage des données initiales mais aussi conduisent à mieux se représenter les proportions des rues canyons et la répartition des températures dans le quartier des halles. Sans avoir des réponses toutes faites, ces représentations amènent à s'interroger, par exemple, sur l'impact de l'espace ouvert des halles qui semble plus marqué à l'Est qu'à l'Ouest de la zone ou sur le fait

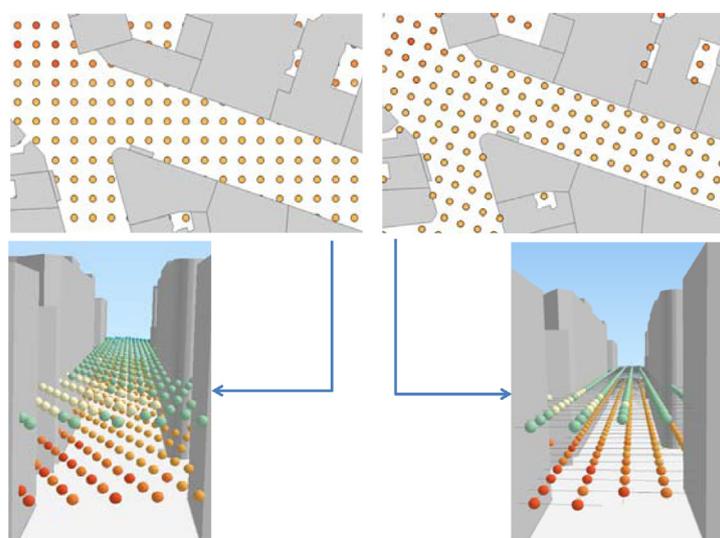


Figure 17. Représentation des grilles en 2D et 3D des températures extérieures pour deux hauteurs et réorientation de la grille en fonction de l'orientation de la rue

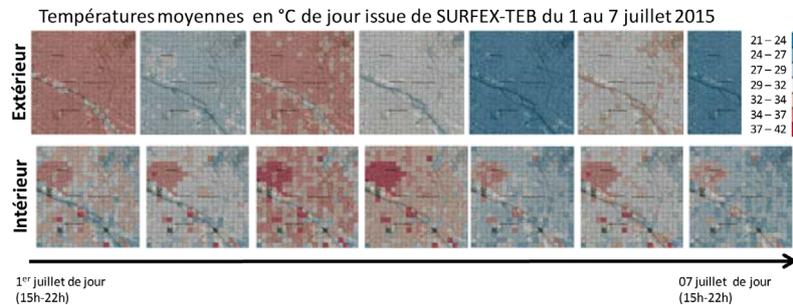


Figure 18. Utilisation de « petits multiples » pour mettre en valeur la succession des températures diurnes intérieures et extérieures

qu'à ce niveau de granularité, on ne perçoit pas l'impact des arbres le long de l'avenue Sébastopol, peut être parce que les valeurs sont moyennées ou que le modèle ne les prend pas assez en compte. On notera également que la représentation par projection sur des objets support met plus en valeur l'effet de maillage, alors que la représentation par grille, qui est obtenue par création de grille plus dense que les données initiales et lissage de valeurs (extrapolation), montre plutôt le caractère continu du phénomène. Chaque représentation fait sens, en permettant d'explorer le phénomène et d'avoir plus de recul sur les données visualisées.

Une représentation de type grille en 3D permettrait de voir deux grilles selon l'altitude dans le cas où ces données seraient accessibles. En [figure 17](#) les données ont été simulées, puisque nous ne disposons que d'un champ de valeur à 2 mètres. Dans le cas où plusieurs altitudes seraient disponibles l'orientation de la grille en fonction de l'orientation de la rue et l'ajout de structure sous la forme d'un quadrillage faciliterait la lecture des données ([figure 17](#), bas droite). La réorientation locale de la grille génère un nouveau calcul de valeurs en fonction de la position de la grille initiale.

Pour ces deux cas applicatifs différents modes de représentation sont proposés. Les sites web permettent soit d'explorer un état à différents niveaux de détail, soit de voir la succession d'états à l'aide d'animations. L'animation peut être stoppée n'importe quand et le lecteur peut revenir en arrière, avancer, changer de niveau de détail. Pour la publication papier des résultats sans animation, la séquence est présentée sous la forme d'une succession de petites cartes imprimées ([figure 18](#)), des *small-multiples* (Tufte, 1983).

6. Conclusions : voir les phénomènes dans leur environnement

Pour reprendre les propos d'Helen Couclelis (1992), les points, lignes et surfaces n'existent pas dans la nature. L'article se termine sur une suite de conseils pertinents parmi lesquels "Choose your system to fit your main purpose (..) if in doubt, choose raster as it is better compatible with phenomena at geographic scales (..) better still

demand a system that supports both raster and vector equally”. Dans ce papier nous proposons des solutions pour représenter conjointement des objets bien définis et des champs à l’aide d’objets graphiques vectoriels construits pour optimiser l’exploration contextuelle de champs de valeur. Ainsi nous pouvons proposer une représentation jointe d’objets bien définis et de champs sans devoir choisir entre une représentation vectorielle ou raster.

Bien qu’imparfaites les vues objets et champs restent des représentations clés d’un monde complexe que nous essayons de comprendre. Ce monde nous le décomposons intellectuellement en entités continuantes (pérennes) et occurrentes. Si l’identité semble plus facile pour les entités continuantes et bien définies (*bona fide*), les autres types d’entités sont bien là, nous entourent et sont l’objet de nombreuses recherches, notamment sur le climat urbain et la pollution. Ces phénomènes sont difficiles à définir, à mesurer et à représenter. Pourtant la co-visualisation d’entités continuantes et occurrentes est essentielle à l’analyse, notamment pour l’étude des interactions ou de la pertinence des modèles et de leur paramétrage. Ni la pollution ni le climat urbain ne sont des phénomènes hors sol. Ils sont le produit entre autres de nos activités, ils sont impactés par les formes de la ville, leurs matériaux, et ils touchent les espèces végétales et animales qui partagent et composent ce même territoire. Nous proposons donc de co-visualiser les entités de type objets, bien définis, avec les entités de type champ à l’aide d’objets graphiques *ad hoc*.

Ainsi pour pouvoir représenter ces phénomènes, nous les *objectifions* : nous créons des petits objets graphiques observables à différents niveaux de détails. La création d’objets individuels permettrait aussi d’associer des informations à chaque nœud consultable interactivement comme la valeur mais aussi la précision locale si cette information était disponible et différenciée localement. Nous proposons un modèle de données permettant ces représentations ; modèle qui sépare clairement les données sources (qui ont leur propre qualité), des données construites pour faciliter l’exploration visuelle de l’information. Nous proposons différentes solutions pour voir les données de type champ : 1) sous la forme de carroyage, 2) sous la forme de grilles composées de petits symboles surfaciques permettant de ne pas masquer l’espace support, 3) en projetant ces données sur certains objets de l’espace support, ou 4) en créant des objets cartographiques adaptés à partir de l’espace support (cas des segments de canalisation). La visualisation résultante permet de voir l’espace support selon les standards de représentation, ainsi que les champs de valeur à différents niveaux de détail.

Reste à se plonger dans ces représentations pour commencer l’exploration des données.

Bibliographie

Andrienko N., Andrienko G. (2006). *Exploratory Analysis of spatial and temporal data. A systematic approach*. Springer.

- Couclelis H. (1992). People manipulate objects (but cultivate fields): Beyond the raster-vector debate in GIS. *Theories and Methods of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space*. Frank A.U., Campari I., Formentini U. (Eds), *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 639. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Davoine P.-A., Moïsuc B., Gensel J. (2012). Genghis : un environnement pour la génération d'interfaces de visualisation spatio-temporelles. *Développements logiciels en géomatique. Traité IGAT*, Lavoisier, Paris.
- Duchêne C., Christophe S., Ruas A. (2011). Generalisation, symbol specification and map evaluation: feedback from research done at COGIT laboratory, IGN France. Special Issue : *Validation of EO-derived information for crisis management: a Digital Earth perspective in the VALgEO expert community*. *International Journal of Digital Earth (IJDE)*, vol. 4, n° 1, p. 25-41.
- Dumont M., Touya G., Duchêne C. (2017). Alternative transitions between existing representations in multi-scale maps, *Proceedings of the 2017 International Cartographic Conference*, Washington.
- Gautier J., Davoine P.-A., Cunty C. (2016). Helical time representation to visualize return-periods of spatio-temporal events. *19th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, June 2016, Helsinki, Finlande.
- Masson V. (2000). A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 94, p. 357-397.
- Mathian H., Sanders L. (2014). *Objets géographiques et processus de changement*. ISTE, London.
- Pham A. (2017). *Amélioration de la représentation cartographique de phénomènes urbains*. Thèse en Informatique, Université Paris-Est.
- Pinson L. (2016). *Analyse et représentation des épisodes caniculaires en zones urbaines denses*. Thèse en Science de l'information géographique. Université Paris-Est.
- Pumain D., Saint Julien T. (2010). Analyse spatiale. *Les localisations*. Armand Colin, Paris
- Ruas A. (2004). *Le changement de niveau de détail dans la représentation de l'information géographique*. HDR, Université Paris-Est.
- Tobler W. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region, *Economic Geography*, vol. 46, n° 2, p. 234-240.
- Tufte E. (1983). *The visual display of quantitative information*, 2e Edition, Graphics Press.
- Waeytens J., Chatellier P., Bourquin F. (2013). Sensitivity of inverse advection-diffusion-reaction to sensor and control: a low computational cost tool. *Computers and Mathematics with Applications*, Elsevier, vol. 66, n° 6, p. 1082-1103.