



HAL
open science

Études des dynamiques de l'occupation du sol - Questionnements, simplifications et limites

Julien Perret, Cyril de Runz, Xavier Rodier, Anne Varet-Vitu, Bertrand Dumenieu, Laure Saligny, Pascal Cristofoli, Bastien Lefebvre, Eric Desjardin

► To cite this version:

Julien Perret, Cyril de Runz, Xavier Rodier, Anne Varet-Vitu, Bertrand Dumenieu, et al.. Études des dynamiques de l'occupation du sol - Questionnements, simplifications et limites. *Revue Internationale de Géomatique*, 2015, Modéliser les dynamiques spatiales, 25 (3), pp.301-330. 10.3166/RIG.25.301-330. halshs-01182622

HAL Id: halshs-01182622

<https://shs.hal.science/halshs-01182622>

Submitted on 22 Jul 2019

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

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

Études des dynamiques de l'occupation du sol

Questionnements, simplifications et limites

Julien Perret¹, Cyril de Runz², Xavier Rodier³, Anne Varet-Vitu⁴, Bertrand Dumenieu^{1,4}, Laure Saligny⁵, Pascal Cristofoli⁴, Bastien Lefebvre⁶, Éric Desjardin²

1. Université Paris-Est, IGN, laboratoire COGIT

{julien.perret,bertrand.dumenieu}@ign.fr

2. CReSTIC, IUT de Reims Châlons Charleville, Université de Reims Champagne-Ardenne

{cyril.de-runz,eric.desjardin}@univ-reims.fr

3. CNRS, UMR 7324 CITERES-LAT (Université François Rabelais - CNRS)

xavier.rodier@univ-tours.fr

4. EHESS, Laboratoire de démographie et d'histoire sociale (LaDéHiS-CRH), UMR 8558 (CNRS - EHESS)

{Anne.Vitu,Pascal.Cristofoli}@ehess.fr

5. CNRS, Maison des Sciences de l'Homme de Dijon (USR 3516 CNRS - Université de Bourgogne)

laure.saligny@u-bourgogne.fr

6. Université Toulouse - Jean Jaurès, UMR 5608 TRACES - Terrae

bastien.lefebvre@univ-tlse2.fr

RÉSUMÉ. Ces dernières années, de nombreux projets ont porté et portent sur l'étude des transformations d'un territoire au cours du temps. Les phénomènes étudiés sont alors constitués de composantes temporelles, spatiales et fonctionnelles. Cette multiplicité des attributs est le cœur d'une certaine complexité. Nous proposons dans cet article d'articuler notre réflexion autour des modèles en partant de la définition du cadre de l'étude pour aller vers l'analyse des transformations, de l'évolution des objets dans une ou plusieurs des trois dimensions précédentes. Notre démarche sera illustrée par plusieurs projets ayant des domaines d'application variés : géographie, archéologie, histoire, agriculture. Pour chaque projet, nous détaillons les hypothèses simplificatrices utilisées.

ABSTRACT. In recent years, many projects have focused on studying the transformations of a territory over time. The phenomena are then made of temporal, spatial and functional components.

This multiplicity of features is the core of some complexity. We propose in this paper to revolve our thinking around the models starting from the definition of the scope of the study up to the analysis of transformations. Our approach is illustrated with several projects carried out in various application domains: geography, archeology, history, agriculture. For each project, we state the simplifying assumptions.

MOTS-CLÉS : dynamiques spatiales, occupation du sol

KEYWORDS: spatial dynamics, land cover

DOI:10.3166/RIG.25.301-?? © 2015 Lavoisier

1. Introduction

Cet article a pour objet l'étude et la modélisation des dynamiques d'un territoire dont les découpages successifs (ou les objets le composant) évoluent au cours du temps dans leur fonction et/ou dans leur empreinte spatiale. Par exemple : les cultures occupant une parcelle varient le plus généralement d'une année sur l'autre ; le remembrement implique une restructuration spatiale des parcelles ; la dynamique dans la longue durée de l'espace ancien où les observations sont des concentrations de vestiges de formes, de tailles et d'épaisseurs variables (Galinié *et al.*, 2007) caractérisant des zones d'occupation d'une ville des origines jusqu'à nos jours. Les structures en jeu dans ces dynamiques couvrent plusieurs échelles géographiques allant de l'agglomération à l'édifice en passant par la ville, le quartier, l'îlot, la parcelle, l'immeuble ou encore le vestige ou la structure archéologique.

Les questions qui se posent alors portent sur la nature des découpages à la fois spatiaux, temporels et fonctionnels. Ces questions et les choix effectués dépendent tant des objectifs de l'étude, des moyens mis en œuvre, que des données exploitées. Ces différents aspects, cadres, échelles et structures donnent lieu à différents modèles de représentation. Dans cet article nous étudions l'ensemble des modèles et nous attachons à identifier les similitudes et les spécificités.

Le travail présenté ici repose sur une réflexion quant aux facteurs communs et différences des modèles *OH_FET*¹, *SIG_PARIS*², *ObservOX*³ et *GeOpenSim*⁴ (cf. infra 3). Bien que ces modèles établis dans l'objectif de l'étude des dynamiques de l'occupation du sol soient issus de problématiques différentes – travail sur le temps long et données archéologiques pour *OH_FET*, données historiques dans *SIG_PARIS*, données agronomiques dans *ObservOX* et données urbaines contemporaines pour *GeOpenSim* – une base conceptuelle commune émerge : la triade des dimensions temporelle, spatiale et fonctionnelle formalisée par Peuquet (Peuquet, 1994). Cette base

1. Objet Historique Fonction Espace Temps
2. Système d'Information Géographique sur PARIS
3. OBSERVatoire Orienté Xénobiotiques
4. plate-forme GÉOgraphique OPEN-source de SIMulation

conceptuelle large laisse la place aux simplifications et spécifications nécessaires à l'adaptation aux différents contextes. La principale contribution de cet article porte sur l'étude et l'analyse comparative des différents modèles en se plaçant dans la lignée de la triade de Peuquet.

Cet article s'organise comme suit. Nous présenterons, dans un premier temps (section 2), le modèle de Peuquet servant de base commune à l'ensemble des projets. Nous introduirons ensuite (section 3) les différents projets au regard de la triade temps/espace/fonction en observant comment elle est adaptée à chaque cadre, ainsi que les simplifications correspondantes. Nous proposerons dans la section 4 une discussion autour des différences entre les modèles. La section 5 en forme la conclusion.

2. Une base conceptuelle commune : l'approche de Peuquet

2.1. Étude des phénomènes spatio-temporels

Classiquement, les bases de données spatiales permettent de représenter l'espace sans considération pour les dynamiques qui y sont à l'oeuvre. En résulte une représentation « figée » dans le temps (Peuquet, 1994), qui ne permet pas d'analyses impliquant une dimension temporelle. Pourtant, l'imbrication des dimensions spatiales et temporelles est un élément essentiel pour la géographie (Parkes, Thrift, 1980), support de nombreuses études des dynamiques de l'espace (Pumain, 1993 ; White, Engelen, 2000 ; Barthelemy *et al.*, 2013). L'incapacité des bases de données spatiales à gérer de telles données (que ce soit pour des raisons de modélisation ou d'implémentation), spatio-temporelles par essence, a donné naissance à une grande variété de modèles (Peleki *et al.*, 2005 ; Rathee, Yadav, 2013) durant les dernières décennies, produisant en particulier de nombreux modèles de SIG spatio-temporels (Yuan, 2008).

Armstrong (Armstrong, 1988) pose ainsi dès 1988 le modèle *snapshot*, basé sur une représentation raster de l'information. Un *snapshot* est une couche raster munie d'une temporalité, chaque *snapshot* correspondant ainsi à un instantané de l'espace et à un point fixé dans le temps. Outre la redondance des données, ce modèle ne permet cependant qu'une représentation discrète du temps et ne stocke pas intrinsèquement les dynamiques de l'espace : celles-ci doivent être lues dans la suite des *snapshot*. Langran et Chrisman (Langran, Chrisman, 1988) proposent quant à eux un modèle où des couches de données vecteurs dotées d'une date sont découpées dès qu'il y a changement dans l'une des dimensions spatiale, ou attributaire. Chaque zone de l'espace inchangée pendant un temps sur deux autres dimensions est alors un objet vecteur. À partir d'une carte de base (à la première date), le modèle permet de créer des *space-time composites*, cartes de l'espace à une date donnée contenant l'accumulation des éléments découpés jusqu'à la date choisie. Reprenant le paradigme objet utilisé en informatique, Worboys (Worboys, 1994a ; 1994b) propose un modèle « spatio-bitemporel » constitué de deux types d'objets : les *ST-simplexes* et *ST-complexes*. Un *ST-simplexe* est l'élément spatio-temporel le plus simple, formé d'un couple $\langle S, T \rangle$ d'une composante spatiale S et d'un élément bitemporel. Les *ST-complexes* sont eux définis comme un ensemble fini de *ST-simplexes*, soumis à quelques contraintes afin

d'assurer la cohérence spatiale et temporelle de l'objet. Un grand nombre de modèles basés sur une approche objet ont été proposés par la suite. S'il nous est impossible d'en faire l'inventaire ici, plusieurs auteurs ont fait un état des lieux de la recherche dans le domaine. Peleki *et al.* (2005) et Rathee et Yadav (2013) donnent un bon aperçu du paysage des modèles spatio-temporels en général et des modèles objets en particulier.

L'ensemble de ces modèles tentent de répondre au besoin de représenter, stocker, analyser des données spatio-temporelles. Cependant, ils échouent généralement à décrire correctement les dynamiques de l'espace par leur incapacité à représenter explicitement les transformations de l'espace en tant qu'événements (Chrisman, 1993). Peuquet et Duan (Peuquet, Duan, 1995) introduisent ainsi un modèle capable de stocker explicitement les événements affectant un espace représenté sous forme de rasters. Ce modèle ESTDM (*Event Oriented Spatio-Temporal Data Model*) propose de stocker les changements sous forme d'événements datés, composés d'éléments pointant vers une cellule du raster affectée par l'évènement. Les événements sont organisés sous forme d'une liste doublement chaînée, permettant de reconstituer la suite d'événements à partir d'un espace de base. Plus récemment, le modèle GEM (Worboys, Hornsby, 2004) fusionne quant à lui objets et évènements en considérant ces derniers comme des objets, liés aux objets spatiaux ou spatio-temporels par des relations de participations mais aussi entre eux. De telles relations sont catégorisées d'après l'ontologie proposée par (Grenon, Smith, 2004) : *initiation, perpetuation/facilitation, hindrance/blocking, termination*.

On le voit, les modèles proposés sont à la fois nombreux et variés, traduisant tant la jeunesse du domaine que l'absence de consensus sur la modélisation des phénomènes dynamiques au sein des SIG. Dans un effort pour définir un cadre commun aux modèles de données spatio-temporels et placer le discours d'un point de vue plus théorique, Peuquet (Peuquet, 1994) définit un cadre conceptuel dénommé TRIAD visant à représenter les phénomènes spatio-temporels comme l'articulation de trois dimensions : sémantique (*what*), spatiale (*where*) et temporelle (*when*), chacune étant induite par la combinaison des deux autres. L'objet d'étude est alors défini par le niveau auquel se place l'analyse, et se trouve alors inclus au sein d'une hiérarchie d'objets observés à des échelles différentes.

Depuis quelques années les chercheurs proposent différentes modélisations fondées sur des graphes de phénomènes spatio-temporels. Renolen (Renolen, 2000) expose ainsi la notion de « graphes historiques », essentiellement axée vers la représentation des évolutions d'objets spatio-temporels. Ainsi, les différents objets, associés à un temps valide (instant ou période) sont liés entre eux par des liens illustrant les différents cas de transformation (création, altération, destruction, réincarnation, fusion/annexion, scission/séparation, réallocation) et forment un graphe acyclique dirigé décrivant l'ensemble du phénomène étudié. On en trouve notamment une application concrète dans les travaux de Stefani (Stefani, 2010) appliquant cette représentation à l'évolution de monuments historiques. Plus récemment, Del Mondo (Del Mondo, 2011) propose un graphe puis un bigraphe spatio-temporel permettant de stocker des relations spatiales et spatio-temporelles entre différents objets.

Adoptant une approche ascendante, différentes initiatives ont permis de concrétiser certains aspects de la modélisation des phénomènes spatio-temporels. Ainsi, la norme SQLT (Snodgrass, 1992), partiellement implémentée dans plusieurs SGBD -Oracle DB, PostgreSQL en sont deux exemples- traduit la volonté d'introduire des outils de manipulation du temps dans les SIG.

2.2. Triade appliquée aux dynamiques de l'espace

Le cadre conceptuel servant de socle commun à nos différents modèles est fondé sur la modélisation selon trois dimensions, sémantique (quoi ?), spatiale (où ?) et temporelle (quand ?). Il fait appel aux travaux sur la « représentation de l'espace et le temps dans les SIG » publiés dans la *Revue internationale de géomatique* par le GDR Cassini (1999), et à l'article *It's about time* dans lequel D. Peuquet (Peuquet, 1994) propose, pour la représentation des dynamiques temporelles dans les SIG, la triade *What, Where, When*, dont les différentes combinaisons traduisent les états, les changements d'état et le processus de changement d'état.

Les trois dimensions de la triade (What, Where, When) de Peuquet (1994, p. 447-451) ont été fréquemment utilisées (Egenhofer, Golledge, 1998 ; Lardon *et al.*, 1999 ; Thériault, Claramunt, 1999 ; Ott, Swiaczny, 2001 ; Panopoulos *et al.*, 2003). L'unité d'analyse pertinente se construit en tant que combinaison (par exemple produit cartésien pour *OH_FET* (Lefebvre, 2008)) des trois dimensions Fonction, Espace, Temps, chacune possédant une résolution définie à partir du cadre de l'étude. Cela correspond à l'échelle de perception du phénomène étudié (Saint-Gérard, 2005) ou encore, la notion de granularité spatio-temporelle (Langlois, 2005).

La détermination des objets d'étude dépend de la focale à laquelle est observé le phénomène étudié. Cependant, les échelles d'analyse peuvent s'emboîter formant à chaque fois un système similaire mais à un niveau supra ou infra, englobant ou englobées par un autre. La répétition de ces emboîtements d'échelle se traduit par la définition d'objets spécifiques à chacune d'entre elles. Le passage de l'une à l'autre peut correspondre à un changement de résolution dans chacun des trois ensembles, fonction, espace et temps. À chacune de ces échelles imbriquées correspondent alors des descripteurs adaptés pour chacun de ces systèmes (Rodier, Saligny, 2010).

2.2.1. Entité spatio-temporelle

Une entité est l'association de trois composantes attributaires, spatiales et temporelles. Techniquement, une première façon de faire consiste à utiliser un produit cartésien, *i.e.* à définir des granules spatio-temporelles qui sont la fusion des informations fonctionnelles (attributaires), spatiales et temporelles (cf. *OH_FET*). Une autre consiste à stocker les trois dimensions séparément et à créer des liens entre les différentes informations sans fixer *a priori* de niveau auquel les liens se font (cf. *SIG_PARIS, ObservOX, GeOpenSim*).

2.2.1.1. Quoi (What?)

Le « Quoi » caractérise la dimension fonctionnelle de l'entité, qu'elle soit géographique, archéologique, historique, agronomique, etc. Cette dimension est liée à l'espace étudié et à la temporalité, mais obéit aussi à ses propres structures du fait de la sémantique associée. Ainsi, dans le cadre des transformations d'une cité sur la période récente, le volume et la qualité des informations disponibles permettraient d'associer et de structurer les concepts sémantiques tels que bâtiment, îlot, quartier, etc. dans une structure hiérarchique. Mais si le quartier est composé d'îlots, il est aussi composé de rues qui peuvent appartenir à plusieurs quartiers. Les structures taxonomiques classiques ne sont donc par forcément les plus adaptées. Aussi, les recherches actuelles, notamment dans le cadre des projets *GeOpenSim* et *ObservOX*, privilégient une structuration plus complexe (graphe, ontologie, etc.).

Dans le cadre des études portant sur l'espace urbain dans le temps long, la dimension fonctionnelle va varier en fonction des éléments archivés ou découverts. Ces limites simplifient le besoin de structure mais complexifient les analyses possibles. Par exemple, dans le modèle *OH_FET*, la structure sémantique utilisée est adaptée à partir de celle élaborée par le Centre national d'archéologie urbaine (CNAU), qui est hiérarchique. Cependant, cette structuration n'est pas ajustée au changement d'échelle et doit être repensée selon que l'on s'intéresse non plus à la ville mais au quartier ou à la parcelle.

2.2.1.2. Où (Where?)

Le « Où » décrit la dimension spatiale de l'entité. Cette dimension est certes liée à la fonction et au temps mais surtout, elle est le plus souvent directement issue de l'observation. Si elle paraît la plus simple à appréhender, la détermination de ses limites est cependant difficile car de nombreux problèmes peuvent en altérer la qualité (Fisher *et al.*, 2005).

Les principales simplifications de la dimension spatiale correspondent aux deux modes de représentation : vecteur et raster. Si, comme indiqué précédemment (voir 2.1), les modèles raster ont longtemps été privilégiés, le mode vectoriel permet l'exploitation des règles topologiques (Egenhofer, Golledge, 1998) et de relations spatiales plus complexes pour l'étude des dynamiques spatiales. Aussi, à la fois par le graphe planaire et la vectorisation des entités, l'ensemble des projets présentés ici s'inscrit dans ce dernier cadre. Que nos entités soient des morceaux de mur (*OH_FET*), des tronçons de rues (*SIG_PARIS*), des parcelles agricoles (*ObservOX*), des bâtiments (*GeOpenSim*), à des échelles sémantiques différentes, nos modèles les exploitent le plus souvent comme les polygones/polylignes d'un graphe planaire.

2.2.1.3. Quand (When?)

« Quand » porte sur les multiples temporalités de nos entités (Thériault, Claramunt, 1999) : date de l'observation, de l'acquisition, de la mise à jour, mais aussi période de pertinence (validité, confiance), etc. Dans le cadre de l'étude des dynamiques de l'occupation du sol, cette dernière information est capitale : l'objet archéologique a,

par définition, une période durant laquelle il a été exploité, selon la fonction associée ; l'étude des dynamiques porte sur une période et les entités étudiées ne sont pas des apparitions instantanées (pour une compréhension des phénomènes de la mobilité, voir l'article relatif dans cette revue) ; la répartition des activités viticoles au cours du cycle annuel (travail de la vigne puis vendange). Ainsi, dans le cadre de nos problématiques, la temporalité principale porte sur la période de pertinence.

2.2.1.4. Différents types de liens

Une entité spatio-temporelle possède des composantes fonctionnelles, spatiales et temporelles. Néanmoins, ces composantes ne représentent pas la totalité de l'entité. Celle-ci peut en effet être enrichie par des liens de différentes natures (Del Mondo *et al.*, 2010). Ces liens peuvent être spatiaux (par exemple hiérarchiques) et représenter l'imbrication d'entités les unes dans les autres (un bâtiment appartenant à un îlot, appartenant lui-même à un quartier, appartenant à une ville, etc.). Il peut s'agir des relations topologiques qu'entretiennent les entités entre elles. Ces liens peuvent aussi être fonctionnels ou sémantiques (liens entre concepts dans une ontologie par exemple). Ces liens peuvent être temporels (liens entre des représentations de la même entité dans plusieurs sources) et porter sur la chronologie relative des entités. Enfin, ces liens peuvent être spatio-temporels et par exemple, représenter les relations de filiation entre entités (un jardin et des cours appartenant à un hôpital découpés en parcelles et réinvesties par des particuliers qui transforment le tout en logements et en ateliers) (Gribaudo, 2009).

2.3. Conclusion

La triade de Peuquet permet une identification des dimensions nécessaires à la représentation de nos données. Si nos modèles diffèrent sur la structuration effective (notamment sur le produit cartésien ou les dimensions séparées), le cœur de l'approche et des questionnements sous-jacents est intrinsèquement commun. La triade est donc transformée en modèle dans nos différentes approches. Ces transformations impliquent des simplifications, des limites, des approximations, mais permettent par ailleurs la complétion de la triade dans le but de la représentation explicite des phénomènes étudiés et de leurs dynamiques. Nos modèles, présentés dans la partie suivante, peuvent être vus comme des spécialisations de la triade de Peuquet pour nos cas d'étude tout en offrant un cadre généralisable au moins aux objets de même ordre.

3. Modèles étudiés

Afin d'étudier un phénomène, les modèles sont conçus pour coller au plus près au temps, à la spatialité et à la nature du phénomène. Les choix de modélisation sont ainsi faits en fonction des entités et des données étudiées.

3.1. *OH_FET*

3.1.1. *Questions, objectifs et phénomènes*

Ces travaux de modélisation s'inscrivent en archéologie dans l'étude de la fabrique urbaine sur le temps long, des origines de l'établissement urbain à nos jours. La fabrique urbaine, décrite par Henri Galinié (Galinié, 2000), désigne les interactions entre un espace, un environnement et les activités sociales et humaines, la ville étant le résultat « d'une dynamique interactive entre la structure évolutive des groupes sociaux et l'aménagement de l'espace » (Galinié *et al.*, 2007). Malgré une information archéologique et historique fragmentée et hétérogène, l'archéologue tente de décrire et de comprendre l'espace urbanisé et ses variations sur une durée de près de deux mille ans. Pour y parvenir il produit une documentation raisonnée décrivant des états des lieux chronologiques et raisonnés. Or, l'un des écueils dans le domaine de l'archéologie urbaine, est bien la nature figée des états chronologiques décrits (*snapshots*) qui empêche la perception et la restitution des changements entre ces états.

Aussi, notre modélisation a pour objectifs de produire, *a posteriori*, autant d'états des lieux que nécessaire mais aussi, de restituer le changement d'état. L'observation et la production de ces changements d'état permet d'étudier alors les processus de transformation. Ces processus se caractérisent grâce à l'observation des apparitions, des disparitions, des héritages, des inerties, des trajectoires, et des dynamiques de chacun des éléments de topographie urbaine ainsi que de leurs associations et relations mutuelles. Par ailleurs, avec ce modèle, nous souhaitons étudier la fabrique urbaine de l'échelle de la parcelle à celle de la ville et comprendre les rythmes urbains dans leur variabilité scalaire. Enfin, la production d'un modèle commun et généralisable à l'ensemble des espaces urbanisés, nous offre la possibilité de comparer la formation et la transformation des villes étudiées, dans leurs trajectoires et leur rythme en mettant en exergue les points communs et les divergences spatiales ou temporelles.

Pour atteindre ces objectifs le modèle, en tant que socle d'un futur système d'information géo-historique, doit autoriser (Rodier, Saligny, 2010) :

- l'intégration et le croisement d'informations et de sources lacunaires et hétérogènes
- la conservation de la nature propre de chaque lieu en offrant une représentation multiple d'une même réalité à savoir leurs mutations fonctionnelles, temporelles et spatiales
- la lecture verticale et horizontale des phénomènes (que se passe-t-il à telle époque ? quelle sont les transformations de tel lieu ?)
- la non-redondance des informations nécessaire à la perception des changements et des processus.

3.1.2. *Observations, objets et sources*

Élaboré pour étudier la fabrique de la ville dans le temps long, le modèle *OH_FET* repose sur une approche systémique et systématique de l'espace urbanisé ancien. Le

système considéré est alors constitué des dimensions fonctionnelle (usage social), spatiale (localisation, étendue et morphologie) et temporelle (datation, durée et chronologie). La pierre angulaire de ce modèle est l'objet historique (OH) qui correspond à la notion d'observation.

3.1.2.1. Définition et constitution des OH

Concernant les études archéologiques et historiques des villes, l'unité analytique pertinente propre à l'échelle d'observation retenue est l'objet historique (OH). À l'échelle de la ville, il s'agira d'une église, d'un marché, d'un cimetière, d'une habitation, etc. ; à l'échelle du quartier, il s'agira d'un jardin, d'une cour, d'un logis ; à l'échelle de la fouille, il s'agira d'un mur, d'un sol, d'une fosse, d'un trou de poteau, etc. Cette unité analytique se définit par le croisement d'informations et de sources qui sont par définition lacunaires et hétérogènes et l'évaluation de la documentation disponible. Chaque objet historique se distingue des autres et se définit obligatoirement par une interprétation ou une caractérisation fonctionnelle (relevant de la dimension de la Fonction), par une localisation ou une emprise (dimension spatiale) et une datation avec une durée (dimension temporelle).

L'Objet Historique correspond à l'unité d'observation telle qu'on la définit pour étudier la fabrique urbaine. Il n'existe pas *a priori* d'OH : ceux-ci sont définis et créés non seulement en fonction des données disponibles mais aussi selon les niveaux d'observation retenus. En effet, les dimensions spatiale, temporelle et fonctionnelle des OH peuvent varier selon les types d'analyse. Ainsi, si l'on étudie la formation d'un tissu urbain à l'échelle d'un îlot, les OH devront permettre de décrire les éléments constitutifs de l'îlot (le logis, la cour, le jardin, l'écurie, l'allée, etc.), tandis que si on étudie la ville, les observations devront s'effectuer à un autre niveau et correspondront à une unité d'habitation, un monastère, un marché, etc.

Afin de rendre compte des changements d'état, il importe qu'à un Objet Historique correspondent une fonction urbaine, une localisation et une datation. Si on constate un changement dans la définition de l'OH, il est nécessaire d'en créer un nouveau. Ainsi, si une maison est transformée en chapelle, la fonction change et il est alors nécessaire de créer un nouvel OH, comme il sera nécessaire de distinguer deux OH si la fonction demeure, mais la localisation ou l'emprise varie, comme par exemple si la place du marché est agrandie. Pour chaque OH il sera nécessaire de préciser les dates de début et de fin de vie.

Si la définition des OH repose avant tout sur l'identification d'un niveau de description fonctionnel, un niveau de représentation spatiale, un niveau de datation, la création des OH dépend aussi des sources qui les renseignent.

3.1.2.2. Les sources mobilisées et leur confrontation

Afin de travailler sur les dynamiques de la fabrique urbaine, plusieurs sources doivent être mobilisées. En fonction de leur nature, plus que de leur potentiel informatif, il est possible de les répartir en trois grandes catégories :

1. les éléments matériels conservés dans le sol ou en élévation (par exemple un mur, un fossé, une sépulture),
2. les mentions écrites dont il existe une grande variété (un diplôme impérial, un registre censier, un acte de vente, etc.),
3. les représentations iconographiques (les plans, les cadastres ou les dessins).

Chacune de ces sources renseigne de manière très diverse les OH et le plus souvent ne livre que des informations partielles et lacunaires. Par exemple, un texte peut mentionner en 337 l'existence d'une église Saint-Lidoire, sans pour autant indiquer son emplacement dans la ville. Ou la fouille peut permettre à l'archéologue de reconnaître l'existence, entre la fin du 11^e et le 14^e s., d'un bâtiment, mais pas d'en identifier la fonction. Dans ces exemples, il est impossible de définir des OH, puisque les trois ensembles (fonction, espace, temps) ne sont pas renseignés.

Aussi, le plus souvent pour construire les OH est-il nécessaire de faire appel à plusieurs informations réparties dans plusieurs catégories de sources, mais cette opération qui consiste à confronter des sources variées pose souvent problème. En effet, les informations ne sont pas toujours comparables, pas toujours suffisamment précises ou complètes. Surtout les informations extraites des diverses sources sont parfois contradictoires. Face à cette hétérogénéité des sources, la création des OH relève d'une opération de synthèse qui repose pour beaucoup sur l'interprétation historique, parfois sur la formulation d'hypothèses. La définition des OH, permet justement de rendre comparable et donc de travailler à partir de données historiques, par nature lacunaires et hétérogènes.

3.1.3. *Modèles et hypothèses simplificatrices*

3.1.3.1. *Modèle*

Le modèle *OH_FET* (cf. figure 1), fondé sur la triade de Peuquet, est centré sur l'inscription de l'objet historique (OH) dans les trois dimensions : fonction (F), espace (E), et temps (T). L'OH, en tant qu'unité d'observation de l'espace étudié, est le produit cartésien des trois ensembles F, E et T dont il est issu. Quelle que soit l'échelle d'application considérée, l'OH est un état fixe d'un élément historique dans un lieu donné à un temps t. Le modèle aborde toutefois les dynamiques de transformation de l'espace urbain de manière analytique par deux approches. La première, unidimensionnelle, consiste à aborder l'OH par chacune des dimensions de manière autonome. En entrée, il s'agit ici de requêtes simples sur une fonction, un lieu ou une date; en sortie, c'est l'observation de la distribution des OH dans chacune des dimensions. La seconde, bidimensionnelle, permet en croisant les dimensions deux à deux (F X E ; F X T ; E X T) d'observer la variabilité de l'une par rapport à l'autre. Ces trois sorties offrent des lectures de l'influence d'une dimension par rapport à une autre permettant la compréhension des processus à l'œuvre dans les changements d'état.

À chaque sortie du modèle *OH_FET* correspond la production de nouveaux éléments d'analyse permettant d'observer :

- La restitution de l'état des OH (F x E x T).

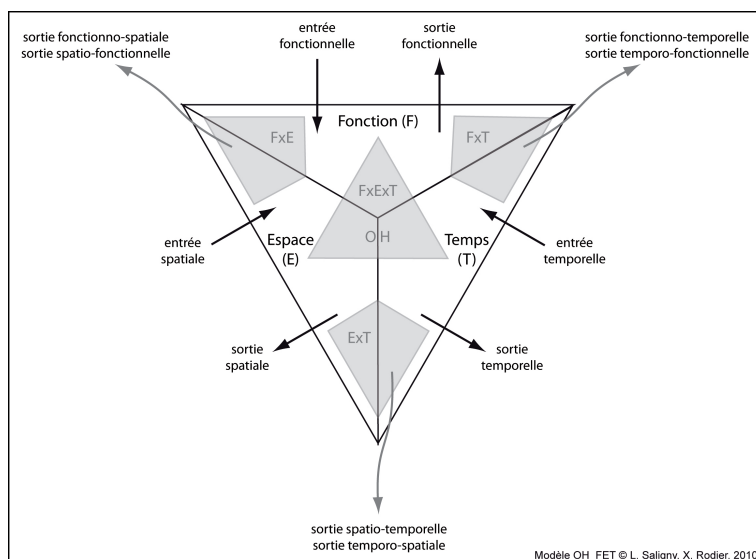


Figure 1. Le Modèle OH_FET et la représentation des objets historiques (OH)

- **F** : L'identification et la quantification des fonctions représentées fournissent une sorte de profil fonctionnel de l'espace urbain considéré dont il peut se dégager, par exemple, des spécialisations : ville administrative, ville commerçante, ville militaire, etc.

- **E** : La fragmentation et la sollicitation de l'espace traduisent la stabilité ou la variabilité de l'usage du sol.

- **T** : La fragmentation et la sollicitation du temps traduisent les rythmes de la fabrique de l'espace.

- La variabilité fonctionnelle dans l'espace (FxE) fondée sur la fréquence de sollicitation des fonctions dans l'espace et le nombre de fonctions différentes dans l'espace.

- La variabilité fonctionnelle dans le temps (FxT) fondée sur la sollicitation des fonctions dans le temps et le nombre de fonction différente dans le temps.

- La variabilité spatiale dans le temps (ExT) fondée sur la sollicitation du temps par l'espace ainsi que la variabilité temporelle dans l'espace (ExT) fondée sur la sollicitation de l'espace dans le temps.

Chacune de ses observations indépendantes renseigne un aspect des dynamiques de transformations de l'espace urbain utile à la compréhension de l'ensemble du système.

3.1.3.2. Les composantes du modèle

À l'intérieur de chacune des trois dimensions, l'information est décomposée en entités élémentaires ou objets simples à partir du corpus d'objet historique (Rodier,

Saligny, 2010). Cette déconstruction des OH en objets simples – l'entité fonctionnelle (EF), l'entité spatiale (ES) et l'entité temporelle (ET) – est nécessaire pour produire les observations de distributions et de variabilité. L'OH se trouve ainsi à la fois au début et à la fin du processus analytique. Issue de la confrontation des sources, il est d'abord déstructuré en entités élémentaires sur la base desquelles il est ensuite recomposé. Chacune des dimensions a sa propre structure.

- La fonction est organisée selon un thésaurus hiérarchisé dans lequel chaque occurrence constitue une entité fonctionnelle (EF).

- L'espace, ensemble initialement le plus formalisé des trois, est structuré sur le modèle d'un graphe planaire topologique obtenu par l'accumulation sur un même plan du contour des OH. Les entités spatiales (ES) sont les portions d'espace qui résulte de cette superposition sans maille prédéfinie.

- Le temps est modélisé par analogie à l'espace en utilisant la topologie temporelle (Allen, 1984). L'accumulation des intervalles de temps correspondant à la durée des OH définit le découpage de la ligne du temps. Les entités temporelles (ET) obtenues sont les portions de temps (dates et intervalles) sans pas prédéfini.

3.1.3.3. Hypothèses simplificatrices

Les choix de la structure du modèle et de chacune des dimensions imposent d'appliquer aux données historiques initiales une rigueur de traitements perturbante pour l'historien ou l'archéologue qu'il traduit par la perte de la valeur sémantique des objets historiques. En effet, l'utilisation du modèle implique d'une part, de laisser de côté les informations pour lesquelles les trois dimensions ne sont pas renseignées, d'autre part, de fixer les limites de l'inscription des objets historiques dans chaque dimension. Ces craintes sont intimement liées à la nature incomplète des sources mises en œuvre pour définir les OH. Cependant, dans les deux cas, les limites acceptables de la simplification pour créer un OH, et de l'inscription dans les dimensions, sont des paramètres définissables. En effet, le modèle n'intègre pas à ce stade la gestion de l'incertitude mais les seuils de tolérance de la simplification des données qu'il impose, restent à l'appréciation du chercheur. Il est, en fait, toujours possible de fixer une interprétation, une localisation ou une datation imprécise pour la rendre comparable à d'autre à une échelle donnée. Dans tous les cas, l'acceptation de ce type de choix, en partie réducteur, est nécessaire pour prétendre à une approche analytique des transformations de l'espace urbain.

3.2. *SIG_PARIS*

3.2.1. *Questions, objectifs et phénomènes*

Au cours de son histoire et de par ses fonctions de ville et de capitale, Paris a perpétué de remarquables permanences en assurant la préservation d'un certain nombre d'éléments témoins de son passé (architecture, topographie, rues) et l'apparente stabilité de l'empreinte spatiale de certains phénomènes sociaux (stratification sociale, distribution de la richesse). Toutefois, Paris s'impose aussi comme un ensemble d'ob-

jets qui se modifie dans l'espace, dans le temps et dans sa nature. Du 18^e siècle à la fin du 19^e siècle, il recouvre des réalités spatiales, sociales et culturelles hétérogènes que nous ne percevons qu'au travers de filtres opérés par plusieurs temporalités enchevêtrées. L'espace urbain parisien change sans conteste au rythme des transformations – dont les durées d'exécution varient – de sa voirie et de l'occupation de son parcellaire. Ces changements ne sauraient être appréhendés sans tenir compte des modifications de l'espace parisien envisagé comme entité administrative et institutionnelle, des temporalités propres aux outils de mesure et de représentation de cet espace, ainsi que des temporalités propres des acteurs sociaux qui investissent et façonnent ce territoire urbain.

Le projet *SIG_PARIS* propose d'étudier les dynamiques parisiennes à l'œuvre au cours des 18^e et 19^e siècles par la prise en compte et l'observation des évolutions conjointes des structures de l'espace, des pratiques sociales qui s'y développent, et des nombreuses représentations de cet espace véhiculées par les contemporains. L'espace parisien est abordé comme une réalité construite, active et signifiante, totalement indissociable des pratiques sociales : durant deux siècles, il est ainsi construit, vécu, mis en forme et mis en scène par les acteurs et les représentations, devenant un repère, porteur de sens et de significations sociales. L'étude d'un tel objet suppose de mobiliser trois dimensions interdépendantes : l'espace, le temps et les pratiques et activités sociales des individus.

La réalisation de ce projet se fonde sur la transcription et la compilation des sources décrivant la structure physique des espaces parisiens comme celle des multiples traces de l'activité sociale conservées dans les fonds d'archives. Celles-ci se déploient dans des documents de natures (plans, registres, dessins, iconographies, textes, etc.) et de statuts différents (intimes ou liés aux activités sociales, professionnelles, administratives, politiques, littéraires, etc.).

Par un travail de confrontation de l'ensemble de ces sources, l'objectif du projet *SIG_PARIS* est d'analyser les moteurs des transformations urbaines comme celles la société parisienne. Le modèle mobilisé permet de gérer la diversité des documents et la mise en relation des informations retenues. Comme toutes données historiques, ces dernières sont bien souvent incomplètes, imprécises et/ou erronées, et surtout étroitement dépendantes des logiques propres au contexte de leur production.

Les informations récoltées sont envisagées en conservant le lien à leur source, considérée dans son intégrité. Il s'agit d'un premier niveau d'observation indispensable à l'exercice de la comparaison, car il préserve le document original et en conserve la cohérence. Le croisement des différentes sources doit ensuite permettre de mettre les informations en relation et en série, et d'en déceler les propriétés, les biais, éventuellement les incohérences et les erreurs.

3.2.2. *Observations, objets et sources*

Deux types de sources sont mobilisés dans le cadre du projet *SIG_PARIS*, selon qu'elles décrivent l'espace parisien ou bien les pratiques sociales qui se développent en son sein. Chacune d'elles est datée avec plus ou moins de précision.

Les informations spatiales sont issues des nombreux plans analogiques et de cadastres propres à l'espace parisien qui ont été conservés dans les archives françaises. Ils constituent autant de « représentations » de la ville inscrites dans des périodes temporelles spécifiques. Chaque plan traduit les préoccupations et les perceptions (ou observations) de ses commanditaires et concepteurs (aménagement, circulation, tourisme, questions cadastrales et fiscales, etc.) et informe sur les catégorisations et les aspects pertinents associés à l'espace parisien à un moment donné. La géoréférenciation de ces sources dans un référentiel spatial unique et leur calage par rapport à des informations spatiales actuelles, garantissent leur comparaison en révélant non seulement l'évolution du territoire de l'entité administrative mais aussi les traces successives de la transformation du parcellaire comme du réseau viaire.

De nombreux corpus documentaires, en grande partie textuels, restituent la trace tangible de l'implantation de phénomènes sociaux extrêmement divers au sein de l'espace parisien. Ils font correspondre les activités et pratiques sociales à des zones particulières de la ville qui dépendent d'échelles d'observation et de ressorts multiples (immeubles, îlots, rues, quartiers, paroisses, etc.) : les annuaires et almanachs ont pour vocation principale l'identification et la localisation des individus, métiers, édifices publics, etc. ; les sources administratives, notariales ou judiciaires précisent en général les différents lieux associés à un acte (résidence des acteurs, des biens, etc.), tandis que des sources fiscales ou politiques recensent les individus selon des références à l'espace (listes électorales, rôles d'imposition, etc.). D'autres sources associent explicitement des représentations spatiales (dessins et plans d'immeubles) à une description sociale : les cadastres peuvent utilement être mis en correspondance avec les sommiers des biens fonciers, documents fiscaux indiquant le nom et la profession des propriétaires et décrivant très précisément l'occupation des espaces, leurs natures et leurs usages.

Plusieurs objets permettent l'exploitation de cet ensemble hétéroclite de sources. Chaque information, référencée en lien avec son document d'origine, est située dans le temps, que ce soit de manière absolue (dates), approximative (intervalles) ou relative (ordres). Deux types d'objets spatiaux sont plus particulièrement retenus : les polygones qui figurent les immeubles, îlots, quartiers, etc., et les objets linéaires qui modélisent le réseau viaire parisien. Ces derniers sont décomposés en tronçons, renseignés par leur géométrie et par des attributs décrivant le réseau. Fréquemment mentionnées dans les documents, les adresses constituent une des principales informations textuelles permettant d'associer les phénomènes sociaux à l'espace. Le traitement de cet objet particulier, notamment l'appariement aux objets spatiaux suppose de renseigner les attributs des tronçons à partir de sources historiques qui rendent compte de l'évolution du réseau viaire, de la toponymie, des différents systèmes de numérotage, etc. Divers objets « thématiques » sont mobilisés : d'une part les individus (et/ou en-

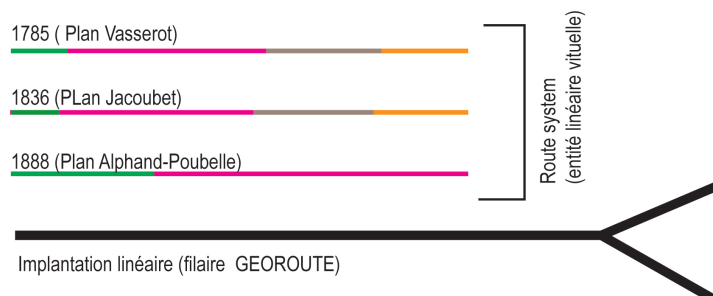
sembles d'individus) dont on désire suivre les trajectoires sociales et spatiales ; d'autre part les multiples marqueurs de l'activité sociale de ces individus : professions, les positions (titres, charges publiques ou privées, affiliations, etc.) et autres statuts observés dans des contextes particuliers (propriétaires, locataires, condamnés, décorés, etc.).

3.2.3. *Modèles et hypothèses simplificatrices*

L'étude des informations rassemblées par le *SIG_PARIS* permet non seulement d'observer l'évolution morphologique de l'espace parisien, mais aussi celle de l'inscription spatiale des phénomènes sociaux (Barthelemy *et al.*, 2013 ; Gribaudo, 2009). Il s'agit de repérer les proximités et lignes de front sociales et spatiales (lignes de fractures socio-professionnelles, distributions de la richesse, etc.). Il s'agit aussi de juger de leur permanence ou non au cours du temps, de leur évolution, par exemple en termes de diffusion, ou bien de leur impact sur la composition de l'espace. Une des principales difficultés est de parvenir à mettre en relation les différentes sources spatiales et/ou sociales nécessaires à l'étude d'un phénomène particulier. Il y a bien souvent des discordances temporelles, ou des problèmes d'échelle et d'échantillonnage, et cela suppose de recourir à différentes hypothèses et ainsi qu'à une modélisation particulière du temps (Gregory *et al.*, 2003).

Différentes méthodes peuvent être mobilisées pour assurer la mise à jour des données spatiales (le graphe topologique correspondant au réseau de rues) dans « le temps » (la période d'étude) en tenant compte des multiples modifications opérées sur le réseau viaire de Paris (créations, modifications ou suppressions de voies, changements de la toponymie et du numérotage de ces voies, etc.), ainsi que des informations propres à la construction des plans de référence. Une solution est, à partir d'une démarche rétrospective (le choix d'une base de données spatiales actuelle comme départ), de procéder au géoréférencement linéaire (ou segmentation dynamique) du réseau unique qui assure l'enregistrement d'événements propres à chaque séquence (date des plans). Cette démarche élimine la multiplication de réseaux spécifiques à chaque plan tout en permettant la spatialisation des adresses historiques à l'aide de procédures de géocoding (ou adressage postal) (Vitu, Capizzi, 2010) (*cf.* figure 2). Une autre hypothèse est de construire indépendamment chaque filaire à partir du plan original et de procéder à leur rapprochement sur la base de procédures automatisées (Dumenieu *et al.*, 2013).

Chaque source pose la question de son échelle, de son emprise territoriale et de son échantillonnage, ce qui suppose des types de traitement et d'analyse différents. L'exemple de la base de donnée du minutier central des notaires parisiens nous assure d'avoir une information à l'échelle de la ville entière pour 1851 (moins de 10 ans plus tard, Paris annexe les communes environnantes). Cette source est cependant très marquée du point de vue de la population qu'elle considère (ceux qui ont les moyens de passer par un acte notarié), et une frange non négligeable de la population n'est pas présente par définition. Dans ce cas, le croisement avec d'autres sources (les condamnés de juin 1848 par exemple) peut utilement compléter le tableau social et spatial de la période considérée.



Pour éviter le fractionnement des entités linéaires à chaque fois que leurs valeurs attributaires sont modifiées, la segmentation dynamique les traite en tant qu'événements de référencement linéaire. Les attributs peuvent être affichés, faire l'objet d'une requête, mis à jour et analysés sans affecter la géométrie de l'entité linéaire sous-jacente. Plusieurs jeux d'attributs peuvent être associés à n'importe quelle portion d'une entité linéaire existante.

Figure 2. Modélisation des réseaux viaires historiques de Paris

3.3. ObservOX

3.3.1. Questions, objectifs et phénomènes

Dans le cadre du développement durable, le projet AQUAL du Contrat de Plan État-Région Champagne-Ardenne a fait apparaître la nécessité de disposer d'un observatoire pour l'étude des pratiques agricoles et de leur pression sur les ressources en eau du bassin de la Vesle intitulé *ObservOX*. Il a pour objet de suivre l'évolution des pratiques agri-viticoles dans le temps et l'espace sur le bassin versant de la Vesle en amont du captage « Grenelle » de Couraux pour :

- constituer un outil d'aide à la discussion pour l'ensemble des acteurs du territoire ;
- fournir des données afin de comprendre et de modéliser les transferts de polluants phytosanitaires d'origine agri-viticole dans l'eau à l'échelle du bassin versant amont de la Vesle.

Dans ce contexte, il s'agit donc d'étudier les pratiques agricoles, et plus particulièrement les modes de diffusion des pesticides durant celles-ci. Ces modes de diffusion diffèrent en fonction de la topologie, de la nature du sol, du type de production agricole et donc des cycles agricoles (calendriers culturels, rotation), des conditions météorologiques, des agriculteurs (âge, formation) et de leur sensibilité au développement durable, des préconisations faites, etc. Les ambitions scientifiques portent ainsi sur la mise en place d'un système d'information et de méthodes d'analyses qualifiées dans le temps et l'espace des phénomènes de diffusion de produits agricoles (Runz, Desjardin, 2009). Le travail effectué porte donc sur l'étude de séries temporelles variées dans les temporalités, les rythmes et les transformations, offrant une représentation multiple des différents phénomènes, traduisant les changements d'états et les actions humaines sur le territoire, travaillant sur les processus de transformations par l'extraction de pattern (héritage, cycles agricoles, recomposition territoriales, etc.) afin

d'observer des dynamiques de développement agricoles du territoire pour l'étude de l'évolution de la pression sur l'eau.

Notre travail est orienté sur la modélisation du temps et de l'espace à l'aide d'informations venant de sources multiples et de qualité diverse. Le temps, l'espace, la fonction, les modes d'action (travail du sol, traitement phytosanitaire, etc.) sont les principales composantes des informations étudiées et que l'on souhaite modéliser. Notre modèle doit donc permettre de répondre aux questions suivantes :

1. Quelle est la répartition spatiale des cultures à un endroit et un instant donné ?
2. Quelles sont les pratiques agricoles sur le territoire en fonction des cultures au cours du temps ?
3. Quelle est la confiance que l'on peut avoir dans les informations fournies au et par le système ?

Pour cela, la représentation du changement d'état dans chacune des composantes de notre information (espace, temps, fonction, modes d'actions) est au cœur de nos problématiques. Si notre système ne permet pas leur interrogation directe, les modes d'analyses que l'on souhaite mettre en œuvre, ont pour but de les extraire.

3.3.2. *Observations, objets et sources*

Observations : l'objectif du projet porte sur l'observation des pratiques agricoles notamment lors de la diffusion des produits phytosanitaires sur le sol.

Objets : les objets que l'on souhaite étudier sont la parcelle culturale, les types de cultures, les exploitations, les interventions sur les champs, les types de produits diffusés, les recompositions spatiales et temporelles. Ces phénomènes sont fortement inscrits dans le temps et dans l'espace.

Sources : une enquête terrain sur une zone pilote, le registre parcellaire graphique, des images satellites et photo-aériennes, Corine Land Cover, le recensement général de l'agriculture, des analyses de l'eau (pour le choix des molécules pilotes), les descriptions des produits phytosanitaires.

3.3.3. *Modèles et hypothèses simplificatrices*

L'entité au cœur de notre modèle est la parcelle culturale que l'on définit comme un espace ayant un même exploitant, un seul type de culture, et sur laquelle on effectue un certain nombre d'interventions agricoles. Nous avons aussi à intégrer l'étude des types de cultures, des exploitations (chef, stratégie de traitement, équipement), des interventions (intervenant, objectif, produits/molécules). Mises à part ces interventions qui ont une temporalité de nature événementielle, l'ensemble des autres entités s'inscrit dans une durée. La représentation du temps exploite donc des intervalles temporels pour représenter une période et des dates pour les événements ponctuels (d'une durée d'un jour ou nulle).

Notre modèle est fondé sur une représentation vectorielle des entités géographiques ce qui en soit est une simplification due à la nécessité de gestion des données dans

un unique système. Nos différentes informations spatiales venant de nos différentes sources sont fusionnées afin d'obtenir une partition (segmentation) de notre territoire d'étude à une unique échelle. Une autre simplification exploitée pour notre modèle est le fait que la diffusion soit uniforme sur une parcelle agricole mais cohérente vis-à-vis des technologies utilisées (buses) et de la représentation choisie (polygone vectoriel). Une représentation simplifiée est évoquée dans la figure 3, utilisant PictograF (Bedard, Larrivee, 2008) pour la représentation de l'espace et du temps.

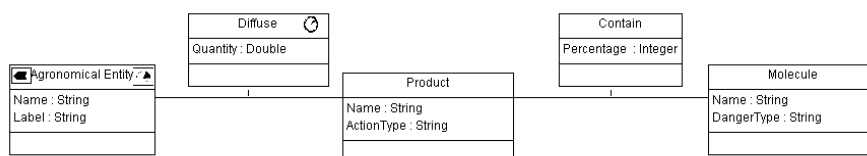


Figure 3. Diagramme de classe simplifié représentant la relation entre les traitements phytosanitaires et les entités agronomiques (espace agricole uniforme)

Les entités étudiées sont directement dérivées de la triade de Peugeot : les composantes spatiales, temporelles et sémantiques forment l'entité agronomique. Les entités sont reliées aux produits phytosanitaires par les dates et quantités de diffusion des produits.

La composition spatiale dans le temps permet de rendre compte des évolutions des pratiques. Ainsi, par l'exploitation des relations topologiques et d'Allen, nous sommes en mesure de répondre aux principales questions en entrée. Nous prévoyons de mettre en place des algorithmes de fouille de données pour l'extraction d'informations sur les séries temporelles.

Des recherches sont en cours sur la mise en place de procédés permettant la qualification des informations pour rendre compte de la confiance que l'on peut en avoir. Nos choix de représentation des données dans le système permet d'aller vers une gestion de l'imprécision des données au travers une vision multi-valuée de l'information (ex : un polygone devient un ensemble de polygones auxquels sont associés des valeurs de confiance entre 0 et 1 où 0 pourrait être assimilé à une confiance nulle et 1 à une confiance absolue) (Zoghلامي *et al.*, 2011 ; 2012). Des opérateurs de combinaison des informations quantitatives floues dans l'espace ont été mises en place (Zayrit *et al.*, 2011). Des travaux sont également menés sur la fusion des informations venant de plusieurs sources à l'aide des fonctions de croyances (Zayrit, 2012).

3.4. GeOpenSim

L'objectif du projet *GeOpenSim* est l'analyse et la simulation de la densification du tissu urbain.

3.4.1. Questions, objectifs et phénomènes

Le projet *GeOpenSim* est né de la rencontre de trois questionnements. Tout d'abord, un questionnement géographique sur les transformations de la morphologie urbaine à grande échelle et, en particulier, sur le changement des propriétés morphologiques des rues, bâtiments, îlots et quartiers sur une période de plusieurs décennies (environ 60 ans). Une telle étude nécessite le suivi d'objets micro et méso géographiques sur plusieurs dates, ce qui nous amène au second questionnement. En effet, si l'on peut identifier des sources de données pertinentes pour observer ces transformations, comment gérer ces données et comment effectuer le suivi des objets ? Enfin, le dernier questionnement concerne les outils et méthodes pour analyser les évolutions de la morphologie urbaine à plusieurs échelles à partir des données acquises, les comprendre et les simuler (Ruas *et al.*, 2011).

3.4.2. Observations, objets et sources

Dans le cadre de ce travail, les sources utilisées ont été principalement des bases de données topographiques actuelles (composante topographique du RGE), des photographies aériennes et des cartes topographiques numérisées. La méthode utilisée est une méthode de saisie manuelle (Skupinski *et al.*, 2008 ; Perret *et al.*, 2009) s'appuyant sur la connaissance d'experts de la cartographie pour la saisie à partir de cartes et de la photo interprétation pour la saisie à partir de photographies aériennes. C'est ainsi l'expert qui résout les principaux problèmes d'incertitude dans les sources, notamment spatiales. En effet, pour le processus s'appuyant sur les cartes, dans certains cas, le fait qu'un bâtiment présent dans la carte de 1989 mais absent dans celle de 1978 ne signifie pas que le bâtiment a été construit entre 1978 et 1989 mais que le processus de généralisation cartographique utilisé (en l'occurrence, il s'agit d'un processus manuel), a choisi de ne pas le représenter pour ne pas surcharger la carte. C'est ainsi par expertise et en s'appuyant sur des sources complémentaires (par exemple la photographie aérienne ayant servi à la constitution de la carte), que l'expert décide de l'évolution du bâtiment. Une autre approche consiste à vectoriser automatiquement ou semi-automatiquement les sources de données (Ormeno Rojas, 2011) afin de simplifier le travail de l'expert. Les principaux objets étudiés sont les îlots, composés de bâtiments et de définis par les réseaux de communication (rues, fleuves, voies ferrées, etc.). Les îlots sont caractérisés par la nature, la forme et la densité des bâtiments qu'ils contiennent.

3.4.3. Modèles et hypothèses simplificatrices

L'une des hypothèses utilisée pour la constitution des bases de données spatio-temporelles est l'utilisation de sources synchronisées. En effet, pour simplifier l'analyse morphologique, nous avons choisi de travailler sur des états successifs de l'espace étudié. On parlera alors de clichés ou de *snapshots* qui peuvent en particulier être analysés afin, par exemple de déterminer la nature des îlots urbains (Puissant *et al.*, 2011 ; Lesbegueries *et al.*, 2012). Cette hypothèse permet de simplifier la phase d'analyse des transformations, mais aussi le suivi des objets dans le temps ainsi que l'apprentissage de règles d'évolution. Ces dernières représentent les règles observées qui ré-

gissent les dynamiques des objets étudiés. Ces règles opèrent à différentes échelles : il s'agira ainsi de règles de changement d'occupation du sol pour les îlots, de règles de construction pour les bâtiments, etc. Ces règles peuvent ensuite être utilisées pour la simulation. La simulation permet alors de vérifier la qualité de règles de transformations définies. Une autre approche consiste à utiliser la simulation pour révéler de nouvelles règles ou améliorer les règles existantes (Curie *et al.*, 2010).

L'approche de simulation utilisée s'appuie sur un système multi-agent qui permet de modéliser les comportements individuels des agents. Un agent est un objet qui possède une temporalité, une emprise spatiale et un ensemble d'attributs. De plus, il est lié à d'autres agents par des relations spatiales ou spatio-temporelles (appartenance d'un bâtiment à un îlot, filiation entre îlots, continuité entre tronçons de rues, etc.). Enfin, il possède un contexte dans lequel il évolue et à l'évolution duquel il participe (Perret *et al.*, 2010).

4. Discussion

Différents questionnements sur la ville peuvent être menés à partir de données spatio-temporelles portant sur les transformations. Les différents points de vue thématiques impliquent des questions et des interprétations spécifiques sur les phénomènes étudiés. Néanmoins, nous trouvons de grandes similarités dans la nature de ces phénomènes. D'un point de vue fonctionnel, il s'agit d'identifier une pratique sociale et sa répartition spatiale au cours du temps. C'est bien la nature de la pratique sociale étudiée ainsi que la temporalité associée à cette pratique qui différencient le plus l'archéologue de l'historien ou du géographe. D'un point de vue temporel, il s'agit très souvent d'identifier des rythmes, des régularités temporelles de transformation de l'espace ou de la fonction d'un espace donné. Pour finir, d'un point de vue spatial, il s'agit de mettre en valeur des héritages, des trajectoires (de villes), des restructurations ou des densifications.

Il existe un lien étroit entre les sources de données disponibles, celles qui sont choisies par le chercheur et les objets étudiés. En effet, les sources ont un impact direct sur les résultats de chaque étude et il convient de choisir celles qui sont les plus adaptées aux questions posées, mais aussi de prendre en compte leurs limites pour l'interprétation des résultats.

Les limites imposées par les sources peuvent être classées comme temporelles, spatiales et fonctionnelles.

4.1. Différentes temporalités

Les limites temporelles concernent dans un premier temps la précision temporelle. On parlera ainsi de temporalités des observations de l'espace, associée aux instruments de mesure et de représentation de cet espace. Plusieurs temps sont ainsi figés dans une carte ou un plan, et certaines sources définissent des dates imprécises (milieu du 11^e

siècle par exemple). Le tableau 1 présente les choix de représentation du temps faits par les différents projets étudiés.

4.1.1. Temporalités des plans

4.1.1.1. Temporalités présidant aux modalités de réalisation des plans

Les sources spatiales ont un point de vue sur l'objet. Située dans le temps et selon les préoccupations et les perceptions des contemporains. Les mêmes informations ne seront pas mises en exergue à chaque période. Intérêt pour les questions de circulation, pour le tourisme, pour les questions cadastrales et des impôts (et même dans une même catégorie, des changements de sens peuvent avoir lieu). De même, il y a des modifications dans les pratiques et les savoir-faire des personnes en charge de la réalisation des plans.

4.1.1.2. Temporalités de la réalisation des plans

Sauf à imaginer une saisie instantanée, un plan est une construction d'un état d'une ville n'ayant jamais existé finalement. Les informations qui sont inscrites sont issues de plusieurs temps d'observations. Cette remarque est aujourd'hui très palpable quand on consulte sur Internet les photos des rues des villes (le Paris de Google Street View est un Paris assemblant des parties de Paris prises à des moments différents). De fait, une carte ou un plan de l'époque est construite sur le même processus.

4.1.1.3. Discordance temporelle des informations d'un plan

Pour la période qui occupe le projet *SIG_PARIS*, l'élaboration de plans de Paris suppose un temps long (qui ne correspond pas forcément aux dates de leur publication). La réalisation du Plan de Verniquet (le premier levé géométrique par rapport à la méridienne de Paris) débute en 1785 et s'achève vers 1795 (tracés des rues et principaux monuments). Le plan Jacoubet donne une vision du tracé des rues entre 1830 et 1836, il offre une correspondance importante avec les informations du Dictionnaire des rues de Paris de Lazare pour la zone la plus ancienne de Paris, moins pour les marges de la ville. L'étude du plan de Vasserot montre qu'il assemble des planches construite sur plusieurs années 1805-1830. Plusieurs incohérences peuvent être relevées du simple fait de cet écart temporel (rues inter-planches avec des incohérences au niveau des noms et de la numérotation par exemple).

4.1.1.4. Anticipation des changements futurs de l'espace

Dans les plans figurent parfois les anticipations des aménagements prévus ou votés, mais dont la réalisation n'est pas automatique. Le plan contient alors plusieurs temporalités différentes (effectives ou potentielles).

4.1.1.5. Temporalité des changements figurés par la succession des plans

Les changements que l'on peut repérer en comparant les plans successifs ne constituent pas un processus continu. Ces plans correspondent à plusieurs états. Ils sont plus

ou moins précis (aussi bien du point de vue des détails qu'ils consignent ou dans leur calcul), ils obéissent aux considérations qui sont à la base de leur réalisation (plan de situation ou de circulation, plan établis pour des fonctions fiscales), du périmètre couvert, de l'échelle choisie, etc.

Pour finir, l'utilisation de plans, de cartes ou des photographies aériennes pour l'étude des transformations de l'espace implique la construction d'états successifs (ou *snapshots*) qui supposent une certaine synchronisation temporelle entre les transformations et ne permettent pas d'étudier finement les transformations ayant eu lieu entre ces états (incomplétude). Pour lever cette limitation, il faut ainsi chercher d'autres sources de données plus précises.

Il se pose alors la question de la continuité spatiale et de la couverture des données. Cette seconde limitation, spatiale, est intimement liée à la première, temporelle. Cette limitation spatiale se retrouve aussi dans la question de l'adressage.

4.1.2. Lien avec la temporalité des changements

La finalité de cette approche est de traiter le temps de manière similaire à l'espace. Il s'agit de sortir du temps support (comme pour l'espace) dans lequel sont observés et comparés les objets spatiaux complexes en interaction. En subordonnant systématiquement le temps à l'espace, il n'est pas possible de rendre compte des multiples temporalités des phénomènes. Pour cela, sur le principe de l'analogie avec l'espace, la prise en compte et la modélisation indépendante de la dimension « temps » autorise la transformation d'un temps support, linéaire et figé à la construction et la visualisation des temporalités. Ce changement de perspective semble être une étape nécessaire pour fonder l'étude des dynamiques sur des analyses dans lesquelles le temps et l'espace ont la même valeur. À partir de la construction de ce modèle, l'objectif est la mise en œuvre d'analyses spécifiques à la dimension temporelle permettant d'appréhender les interactions temporelles, les dynamiques temporelles via la production de cartographies temporelles.

4.2. Différentes organisations spatiales

4.2.1. Représentation

Comme nous l'avons vu en section 2, il existe de nombreuses façons de représenter l'information spatiale. Dans le domaine des SIG, deux catégories sont généralement identifiées : les représentations raster et vecteur. Si les données raster sont le plus souvent utilisées pour la représentation et la gestion des sources graphiques numériques ou numérisées (photographies, cartes, plans, croquis, etc.), l'utilisation d'une grille tend à simplifier la complexité de l'espace et des relations spatiales. C'est probablement pourquoi les auteurs de cet article utilisent tous des données vecteur (le plus souvent acquises depuis des sources raster).

Tableau 1. Description et comparaison de la gestion du temps selon les modèles *OH_FET*, *SIG_PARIS*, *ObservOX* et *GeOpenSim*

	Représentation	Structuration	Granularité	Qualité
<i>OH_FET</i>	Entiers	Instants et Intervalles	Variable en fonction des données et de l'échelle : ~ année → ville (pas de continuité temporelle) ~ année → quartier (continuité temporelle) ~ abstrait (chronologie relative) → fouille (continuité temporelle)	Dépend des sources : pas de pas régulier, ne couvre pas tout le temp. Lacunaires
<i>SIG_PARIS</i>	Instants BD et intervalles (4 instants)	Instants et Intervalles flous	En fonction des sources : ~ année → cartes ~ année, mois, jour → actes ~ chronologie relative → actes notariés, sommiers	Dates issues des sources (cartes, plans etc.), incertaines
<i>ObservOX</i>	Instants et intervalles BD et intervalles multi-valués	Instants et Intervalles flous	Jour (pour l'instant)	Confiance dans les personnes ressources
<i>GeOpenSim</i>	Entiers	Intervalles flous	Année	Dates issues des sources (cartes, photos)

4.2.2. *Structuration*

Les données vecteur ont fait l'objet d'un important effort de normalisation (ISO, OGC, etc.) et la plupart des outils SIG permettent de stocker, gérer et de manipuler ces données (en 2D en tout cas). Néanmoins, comme l'ont déjà souligné différents auteurs (par exemple dans (Timpf, 1999)), les hiérarchies spatiales sont rarement gérées par les SIG. Le tableau 2 illustre les différents types de représentation, les différentes structures de données, la granularité spatiale et la prise en compte de la qualité des données spatiales utilisés par les modèles présentés.

4.3. *Différentes organisations sémantiques*

En archéologie urbaine, la dimension fonctionnelle s'appuie sur l'emploi d'un thésaurus adapté à l'échelle du phénomène observé. Le changement d'échelle ne correspond pas à une imbrication strictement hiérarchique d'un thésaurus dans l'autre. En géographie, en géomatique ou en démographie historique, on utilise un ensemble de concepts partagés et organisés sous la forme d'une nomenclature, d'une taxonomie ou d'une ontologie. Comme nous l'avons vu, la définition d'un tel ensemble de concepts partagés et du vocabulaire associé est un processus complexe et chaque domaine applicatif aura le plus souvent son ontologie propre.

4.3.1. *Les décalages des pratiques sociales de l'espace*

On observe généralement des pratiques sociales avec des références à l'espace, mais sans connexion avec des sources spatiales. Ces pratiques ont lieu dans le temps continu de l'évolution du territoire. Il est donc inévitable d'observer des décalages entre ce que nous révèlent les sources textuelles se référant à l'espace et les images et représentations de l'espace que l'on peut avoir par ailleurs.

Ex : En fonction des changements de régime politique, les toponymes de certaines rues changent régulièrement. Ces évolutions ne sont pas toujours intégrées par les contemporains, qui ont des pratiques différentielles de l'espace. L'approximation ou l'incohérence des sources peuvent cacher des évolutions non encore actées dans les sphères administratives ou politiques, ni dans les plans et représentations de l'espace. Elles peuvent aussi traduire des résistances au changement.

4.3.2. *L'historicité des phénomènes sociaux*

Les changements observés dans les pratiques sociales n'épousent pas forcément les changements spatiaux. L'évolution de certains métiers parisiens par exemple (cf. Almanach) pèse sur l'espace (multiplication de petits ateliers, implantations de fabriques, voies de circulation). L'interdépendance entre ces dimensions ne peut être étudiée sans vision claire de leurs évolutions.

Tableau 2. Description et comparaison de la gestion de l'espace selon les modèles *OH_FET*, *SIG_PARIS*, *ObservOX* et *GeOpenSim*

	Représentation	Structuration	Granularité	Qualité
<i>OH_FET</i>	Vecteur	Graphe planaire pour découpage en entités spatiales	Variable en fonction des données et de l'échelle : ~ 1 m → ville (graphe non complet) ~ 10 cm → quartier (graphe complet) ~ 1 cm → fouille (graphe non complet)	Dépend des sources : pas de mailles régulières, ne couvre pas tout l'espace. Lacunaires
<i>SIG_PARIS</i>	Vecteur	Graphes partiels	~ 1-10 m	Plusieurs sources de données au même moment, à différentes échelles, potentiellement conflictuelles, lacunaires, incertaines
<i>ObservOX</i>	Vecteur et/ou représentation floue par multi inclusion de polygones	Graphe planaire et Partition floue	En fonction des données et de l'échelle ~ 5 m → parcelle agricole	Plusieurs sources plusieurs représentations du même territoire à la même période fonctions de croyance ou floue
<i>GeOpenSim</i>	Vecteur	Graphe planaire hiérarchique	1-10 m	Gérée au moment de la saisie ou de l'appariement des sources

Tableau 3. Description et comparaison de la gestion de la fonction selon les modèles *OH_FET*, *SIG_PARIS*, *ObservOX* et *GeOpenSim*

	Représentation	Structuration	Granularité	Qualité
<i>OH_FET</i>	Thésaurus (CNAU)	Hiérarchique	Valeur urbaine Valeur d'usage Descripteur	Choix effectué au moment de la saisie. Validité chrono-culturelle du thé-saurus, croisement de sources
<i>SIG_PARIS</i>	Typologies diverses	Hiérarchique	Information dans une source, variable (profession, adresse, nom, institution, etc.)	Lacunaire, appariement, croisement de sources
<i>ObservOX</i>	Typologies diverses	Trellis, Analyse Formelle de Concepts	parcelle agricole, type de culture, type de pratique / intervention	Incomplétudes, fusion de données, fusion de types
<i>GeOpenSim</i>	Typologie issue de la nomenclature Corine Land Cover	Hiérarchique	Bâtiment / Îlot / Quartier / Ville	Classification automatique, possibilité de conserver les probabilités d'appartenance, distances sémantiques

5. Conclusion

Dans cet article, nous nous sommes attachés à mettre en perspective les modèles exploités par les projets de recherche *OH_FET*, *SIG_PARIS*, *ObservOX* et *GeOpenSim*. Ces travaux, menés de manière autonome sans concertation préalable, se fondent tous sur la triade de Peuquet. Ils ont chacun spécifié cette triade en fonction de leurs données et du sujet d'étude. Ainsi, nous pouvons dire que la triade de Peuquet est un cadre conceptuel générique utile et pertinente à l'analyse de la dynamique de l'occupation humaine car exploitée dans des domaines variés.

Les différents modèles développés ont cependant leurs particularités. L'un des catalyseur de ces originalités est la variabilité du caractère temporel des études et entités observées. Ainsi, sur le temps long et en présence d'un faible volume de données, l'approche *OH_FET* propose d'exploiter une représentation numérique des objets sous forme de produit cartésien fonction-espace-temps. Cette représentation inclut par essence la combinaison des questionnements dans les trois dimensions de la triade. En revanche, la réutilisation de l'information dans d'autres contextes est fortement coûteuse de par la complexité de gestion de la qualité externe. Cependant, du fait d'un temps plus court et d'une plus forte variabilité dans l'identité des objets, ce n'est pas l'approche choisie par les trois autres projets qui ont privilégié un stockage séparé des dimensions. Cette dernière permet une interrogation séparée du temps, de l'espace et de la fonction, mais implique une plus grande complexité de traitement.

Dans l'ensemble, bien que chaque approche ait ses propres limites et simplifications, elles sont bien adaptées à la problématique étudiée par leurs auteurs. Leurs principales limites portent sur les incertitudes de présence à un instant donné, sur les incertitudes de localisation et sur les possibles ambiguïtés et variabilités sémantiques. La gestion de ces imperfections sont l'objet d'un autre article de ce numéro.

Bibliographie

- Allen J. F. (1984, juillet). Towards a general theory of action and time. *Artif. Intell.*, vol. 23, n° 2, p. 123–154. Consulté sur [http://dx.doi.org/10.1016/0004-3702\(84\)90008-0](http://dx.doi.org/10.1016/0004-3702(84)90008-0)
- Armstrong M. P. (1988). Temporality in spatial databases. In *Gis/lis '88*, p. 880–889.
- Barthelemy M., Bordin P., Berestycki H., Gribaudo M. (2013, 8 juillet). *Self-organization versus top-down planning in the evolution of a city*. Consulté sur <http://arxiv.org/abs/1307.2203>
- Bedard Y., Larrivee S. (2008). Modeling with pictogrammic languages. In *Encyclopedia of geographic information sciences*, p. 716–725. Springer.
- Chrisman N. (1993). Beyond spatio-temporal data models: A model of gis as a technology embedded in historical context. *Auto-Carto*, vol. 11.
- Curie F., Perret J., Ruas A. (2010, mai). Simulation of urban blocks densification. In *13th agile international conference on geographic information science*.
- Del Mondo G. (2011). *Un modèle de graphe spatio-temporel pour représenter l'évolution d'entités géographiques*. Thèse de doctorat non publiée, Géomatique, Université de Brest.

- Del Mondo G., Stell J. G., Claramunt C., Thibaud R. my. (2010). A graph model for spatio-temporal evolution. *Journal of Universal Computer Science*, vol. 16, n° 11, p. 1452–1477.
- Dumenieu B., Perret J., Ruas A. (2013, sep). Une méthode de construction de données spatio-temporelles appliquée aux rues parisiennes du XIXe siècle. In *Sageo'13*. Brest, France.
- Egenhofer M., Golledge R. (1998). *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems*. Oxford University Press on Demand.
- Fisher P., Comber A., Wadsworth R. (2005). Nature de l'incertitude pour les données spatiales. In R. Devillers, R. Jeansoulin (Eds.), *Qualité de l'information géographique*, p. 49–64. Hermes.
- Galinié H. (2000). *Ville, espace urbain et archéologie*. Maison des Sciences de la Ville, de l'Urbanisme et des Paysages, Université François Rabelais, Tours. Consulté sur <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00537090>
- Galinié H., Morin T., Audin P. (2007). *Tours antique et médiéval: lieux de vie, temps de la ville: 40 ans d'archéologie urbaine*. FERACF.
- Gregory I. N., Kemp K., Mostern R. (2003). Geographical information and historical research: Current progress and future directions. *History and Computing*, vol. 13, p. 7–21.
- Grenon P., Smith B. (2004). Snap and span: Towards dynamic spatial ontology. *SPATIAL COGNITION AND COMPUTATION*, vol. 4, n° 1, p. 69–103.
- Gribaudo M. (2009). Ruptures et continuités dans l'évolution de l'espace parisien. l'îlot de la trinité entre les xviii^e et xix^e siècles. *Histoire & Mesure*, p. 181–220. Consulté sur <http://histoiremesure.revues.org/3959?lang=en>
- Langlois P. (2005). Complexité et systèmes spatiaux. *Y. GUERMOND, «Modélisations en géographie: déterminismes et complexités», Lavoisier, Paris.*
- Langran G., Chrisman N. R. (1988). A framework for temporal geographic information. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, vol. 25, n° 3, p. 1–14.
- Lardon S., Libourel T., Cheylan J. P. (1999). Concevoir la dynamique des entités spatio-temporelles. *Représentation de l'Espace et du Temps dans les SIG*, p. 45–65.
- Lefebvre B. (2008). *La formation d'un tissu urbain dans la cité de tours : du site de l'amphithéâtre antique au quartier canonial (5e-18e s.)*. Thèse de doctorat non publiée, Université François Rabelais, Tours. Consulté sur <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00349580/en/>
- Lesbegueries J., Lachiche N., Braud A., Puissant A., Skupinski G., Perret J. (2012, Dec). A platform for spatial data labelling in an urban context. In E. Bocher, M. Neteler (Eds.), *Geospatial free and open source software in the 21st century*, p. 49–61. Springer. Consulté sur <http://icube-intranet.unistra.fr/paprr/2012/4-LLBP12>
- Ormeno Rojas R. (2011). *Aide à la constitution de BD historiques à partir de BD récentes et d'images anciennes*. Mémoire de Master non publié, Université Paris Dauphine.
- Ott T., Swiaczny F. (2001). *Time-integrative geographic information systems: management and analysis of spatio-temporal data*. Springer.
- Panopoulos G., Stamatopoulos A., Kavouras M. (2003). Spatio-temporal generalization: the chronograph application. In *Proceedings of the 21st international cartographic conference*.

- Parkes D., Thrift N. J. (1980). *Times, spaces, and places : a chronogeographic perspective / don parkes, Nigel Thrift* Book; Book/Illustrated. Chichester [Eng.]; New York : J. Wiley.
- Peleki N., Theodoulidis B., Kopanakis I., Theodoridis Y. (2005). Theodoridis. literature review of spatiotemporal database models. *The Knowledge Engineering Review*, vol. 19, p. 235–274.
- Perret J., Boffet Mas A., Ruas A. (2009, 20 novembre). Understanding urban dynamics: the use of vector topographic databases and the creation of spatio-temporal databases. In *24th international cartography conference (icc'09)*.
- Perret J., Curie F., Gaffuri J., Ruas A. (2010, septembre). A Multi-Agent system for the simulation of urban dynamics. In *10th european conference on complex systems (ECCS'2010)*.
- Peuquet D. J. (1994). It's about time: A conceptual framework for the representation of temporal dynamics in geographic information systems. *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 84, n° 3, p. 441–461.
- Peuquet D. J., Duan N. (1995). An event-based spatiotemporal data model (estdm) for temporal analysis of geographical data. *International journal of geographical information systems*, vol. 9, n° 1, p. 7–24.
- Puissant A., Lachiche N., Skupinski G., Braud A., Perret J., Mas A. (2011). Classification et évolution des tissus urbains à partir de données vectorielles. *Revue internationale de géomatique*, vol. 21, n° 4, p. 513–532.
- Pumain D. (1993). Espace et temps dans l'organisation des territoires de la vie quotidienne. *Bottai, Barsotti O. (a cura), Lo spazio e la sua utilizzazione*.
- Rathee S., Yadav A. (2013). Survey on spatio-temporal database and data models with relevant features. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, vol. 3, n° 1.
- Renolen A. (2000). Modelling the Real World: Conceptual Modelling in Spatiotemporal Information System Design. *Transactions in GIS*, vol. 4, n° 1, p. 23–42. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1111/1467-9671.00036>
- 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*.
- Ruas A., Perret J., Curie F., Mas A., Puissant A., Skupinski G. *et al.* (2011). Conception of a gis-platform to simulate urban densification based on the analysis of topographic data. In *Advances in cartography and giscience. volume 2*, p. 413–430. Springer.
- Runz C. de, Desjardin É. (2009, novembre). Spatialisation qualifiée des pratiques et données agricoles pour l'étude des risques de contamination de ressources en eau du bassin de la vesle. revue des problématiques. In *Spatial analysis and geomatics*. Paris, France. Consulté sur <http://crestic.univ-reims.fr/publication/1832/pdf>
- Saint-Gérand T. (2005). Comprendre pour mesurer... ou mesurer pour comprendre ? Y. GUERMOND, «Modélisations en géographie: déterminismes et complexités», Lavoisier, Paris.
- Skupinski G., Puissant A., Weber C., Mas A. (2008). Constitution d'une base de données temporelles urbaines: évolution des tissus urbains de strasbourg. *JIGOT 2008*.
- Snodgrass R. (1992). Temporal databases. In A. Frank, I. Campari, U. Formentini (Eds.), *Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space*, vol. 639, p. 22–64. Springer Berlin Heidelberg. Consulté sur http://dx.doi.org/10.1007/3-540-55966-3_2

- Stefani C. (2010). *Maquettes numériques spatio-temporelles d'édifices patrimoniaux. Modélisation de la dimension temporelle et multi-restitutions d'édifices*. These, Arts et Métiers ParisTech. Consulté sur <http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00522122>
- Thériault M., Claramunt C. (1999). La représentation du temps et des processus dans les sig: une nécessité pour la recherche interdisciplinaire. *Représentation de l'espace et du temps dans les SIG, Revue internationale de géomatique*, vol. 9, p. 67–99.
- Timpf S. (1999). Abstraction, levels of detail, and hierarchies in map series. *Spatial Information Theory. Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science*, p. 76–76.
- Vitu A. varet, Capizzi V. (2010). De la modélisation à l'implémentation : un sig pour paris au xix^e siècle. *Fonti, Metafonti e GIS. Per l'Indagine della struttura storica del territorio, Matteo Panzeri, Angela Farruggia (dir.)*, p. 79–88 et 131–132.
- White R., Engelen G. (2000). High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 24, n° 5, p. 383 - 400. Consulté sur <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971500000120>
- Worboys M. F. (1994a, juillet). Object-oriented approaches to geo-referenced information. *International journal of geographical information systems*, vol. 8, n° 4, p. 385–399. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1080/02693799408902008>
- Worboys M. F. (1994b, janvier). A Unified Model for Spatial and Temporal Information. *The Computer Journal*, vol. 37, n° 1, p. 26–34. Consulté sur <http://dx.doi.org/10.1093/comjnl/37.1.26>
- Worboys M. F., Hornsby K. (2004). From Objects to Events: GEM, the Geospatial Event Model Geographic Information Science. In M. J. Egenhofer, C. Freksa, H. J. Miller, M. J. Egenhofer, C. Freksa, H. J. Miller (Eds.), *Geographic information science*, vol. 3234, p. 327–343. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin / Heidelberg. Consulté sur http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-30231-5_22
- Yuan M. (2008). Adding time into geographic information system databases. In *The handbook of geographic information science*, p. 169–184. Blackwell Publishing Ltd.
- Zayrit K. (2012). Fusion de données imparfaites dans un système d'information agro-environnemental. In *Inforsid*, p. 611-618. Montpellier, France.
- Zayrit K., Desjardin É., Runz C. de, Akdag H. (2011, octobre). Propagation of spatial imprecision in imprecise quantitative data in agronomy. In G. G. C. Fonte L. Gonçalves (Ed.), *International symposium on spatial data quality*, p. 145–150. Coimbra, Portugal, INESC Coimbra.
- Zoghalmi A., Runz C. de, Akdag H., Zaghoud M., Ben Ghezala H. (2011, octobre). Handling imperfect spatiotemporal information from the conceptual modeling to database structures. In G. G. C. Fonte L. Gonçalves (Ed.), *International symposium on spatial data quality*, p. 165–170. Coimbra, Portugal, INESC Coimbra.
- Zoghalmi A., Zayrit K., Runz C. de, Desjardin É., Akdag H. (2012). Vers la construction d'un observatoire des pratiques agricoles : gestion et propagation de l'imprécision des données agronomiques. In *Conférence francophone sur l'extraction et la gestion de connaissance*, p. 537–542. Bordeaux, Hermann.