
Modélisation des objets urbains pour l'étude des dynamiques urbaines dans la longue durée

Xavier Rodier* - Laure Saligny**

Réseau Information Spatiale et Archéologie <http://isa.univ-tours.fr>

** Laboratoire Archéologie et Territoires UMR6173 CITERES
Université de Tours – CNRS
B.P. 60449 – 37204 Tours cedex 03
xavier.rodier@univ-tours.fr*

*** Maison de Sciences de l'Homme de Dijon
UMS 2739 Université de Bourgogne – CNRS
B.P. 26611 – 21000 Dijon
laure.saligny@u-bourgogne.fr*

RÉSUMÉ. L'utilisation des SIG pour l'analyse spatiale des villes préindustrielles dans la longue durée nécessite la formalisation des données disparates issues de sources diverses en entités robustes. Une première modélisation à l'aide de la méthode HBDS (Hypergraph Based Data Structure) nous a amené à distinguer entités fonctionnelles et entités spatiales. Dans cet article nous proposons d'ajouter la dimension temporelle en développant la modélisation. La définition d'objets urbains par trois entités, fonctionnelle, spatiale et temporelle, a pour objectif l'étude des dynamiques de la ville dans le temps long.

ABSTRACT. The use of GIS to study the spatial evolution of pre-industrial cities over the "longue durée" requires rigorously formalising heterogeneous data from different sources into robust entities. An initial model using the HBDS (Hypergraph Based Data Structure) method enabled us to distinguish social and spatial features. In this paper we develop a specific model for the temporal dimension. The definition of urban objects using social, spatial and temporal features enhances the study of urban dynamics of change over the "longue durée".

MOTS-CLÉS : archéologie, espace, fonction urbaine, HBDS, modélisation, SIG, temps, villes

KEYWORDS: archaeology, GIS, HBDS, modelling, space, time, town, urban function

1. Introduction

Le temps, quand il est pris en compte dans les SIG, est toujours associé au mouvement ou au changement d'état, le plus souvent pour des durées courtes et pour gérer l'historique de tracés ou de phénomènes de manière à pouvoir restituer des états successifs. Comme archéologues, notre ambition est de travailler sur les héritages, les inerties, les trajectoires, les dynamiques dans la longue durée. Notre souhaitons donc constituer une base de données géo-historiques dont les objectifs sont :

- d'offrir une vision verticale et horizontale des phénomènes (que se passe-t-il à telle époque ? quelle est l'évolution de tel lieu ?),
- de conserver la nature propre à chaque lieu, à savoir ses mutations fonctionnelles, temporelles et spatiales,
- de ne pas avoir de redondance des informations pour faciliter les analyses et la gestion des données.

La méthode HBDS, Hypergraph Based Data Structure, est fondée sur la théorie des graphes et la théorie des ensembles (Bouillé, 1977). Elle se réfère à deux notions : les objets simples et les objets complexes formés à partir des objets simples. Selon ce système, nous avons proposé un premier modèle (Galinié *et al.*, 2004) distinguant des entités spatiales (ES), objets simples, et des entités fonctionnelles (EF), objets complexes. Cette construction qui permet de s'affranchir des redondances spatiales, nous conduit à affecter le temps et la fonction comme attribut au lien entre ES et EF. En revanche, ce modèle génère des redondances temporelles et implique que le temps et la fonction restent assujettis à l'espace.

Nous proposons une modélisation conceptuelle de l'information archéologique fondée sur sa décomposition selon la fonction, l'espace et le temps. La démarche consiste à définir un modèle spécifique pour chacun de ces trois ensembles avant de proposer un modèle global.

Les objets archéologiques sont en règle générale décrits, quelque soit l'échelle d'analyse, par des typologies organisées selon des thésaurus hiérarchisés. La fonction est donc organisée selon un modèle arborescent.

L'espace est l'ensemble le plus formalisé des trois. Il est structuré sur le modèle d'un graphe planaire topologique sans isthme.

Le temps, toujours considéré comme continu et linéaire, n'a pas fait l'objet, pour les systèmes d'information, de modélisation spécifique. Nous proposons de modéliser le temps par analogie à l'espace.

Les interactions fonction-espace, fonction-temps, espace-temps ou encore fonction-espace-temps sont déterminées par les associations entre les trois ensembles où se trouvent nos objets d'études.

2. L'objet urbain produit de l'association de trois ensembles : fonction, espace et temps

2.1. L'objet urbain comme objet d'étude

Pour l'étude de la fabrique de la ville dans la longue durée (Galinié 2000), l'objet urbain constitue l'unité analytique de l'espace urbanisé ancien, une église, un cimetière, un marché, etc. Sa définition relève de trois ensembles : la fonction, l'espace et le temps. Il s'agit de la triade de Peuquet (1994 : 447-451) fréquemment utilisée (Egenhofer *et al.*, 1998 ; Lardon *et al.*, 1999 ; Thériault *et al.*, 1999 ; Ott *et al.*, 2001 ; Panopoulos *et al.*, 2003). Chacun de ces ensembles peut-être représenté par un cercle superposé avec les deux autres (Figure 1).

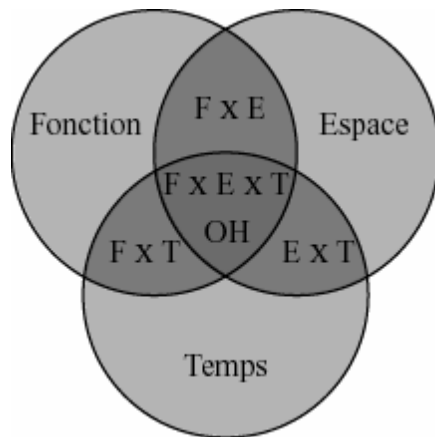


Figure 1. Les trois ensembles : fonction, espace et temps

A l'intérieur de chacun des trois cercles, il existe un processus de réitération lié au mode d'interprétation de la donnée archéologique à la fois inductif et hypothético-déductif (Rodier *et al.*, 2006). Chacun de ces trois processus répond à la logique propre de l'ensemble auquel il appartient. Néanmoins, l'association des trois ensembles implique que chacun des processus est conditionné par les deux autres. Comme l'a montré Donna Peuquet (1994 : 448), "when + where → what ; when + what → where ; where + what → when".

– L'interprétation fonctionnelle d'un objet urbain se fait par le choix d'une fonction dans un thésaurus. La datation, ou plutôt la temporalité, de l'objet urbain comme sa localisation, ou plutôt son inscription dans un espace, influent directement sur ce choix. Certaines occurrences du thésaurus sont des fonctions déterminées par

un espace particulier (cloître canonial, aire funéraire...) d'autres par la chronologie (*domus*, églises paroissiales...).

– La temporalité d'un objet urbain est caractérisée par ses dates d'apparition et de disparition. Même quand la continuité temporelle d'une fonction est assurée, un changement de lieux (déplacement), une modification morphologique significative ou un changement de fonction constitue une rupture temporelle et implique le passage d'un objet urbain à un autre.

– La localisation et la forme d'un objet urbain sont déterminées par la fonction (nécropoles, édifices de spectacle) et la chronologie (nécropoles, systèmes défensifs). En outre, le découpage de l'espace est déterminé par la définition temporelle et fonctionnelle de l'objet urbain (il n'y a pas de découpage matriciel préalable de l'espace d'étude).

Ainsi défini, l'objet urbain est l'équivalent de l'objet géographique « relatif à une échelle, une temporalité et une matérialité des données » réunies dans « la notion de granularité spatio-temporelle » (Langlois, 2005 : 311 ; Saint-Gérard, 2005). Comme archéologues, nous définissons selon les mêmes critères l'objet historique (OH) comme unité distincte des autres de manière univoque. Si nous réduisons la portée de l'objet historique au champ urbain, c'est, d'une part, parce que notre proposition de modélisation spatiale (Galinié *et al.*, 2004) a été construite pour l'étude des villes et, d'autre part, parce que la description sémantique est plus systématique que pour le milieu rural. En effet, la définition des objets d'étude en milieu rural est moins stricte qu'en ville pour plusieurs raisons. L'individualisation univoque d'un objet renseigné par des sources différentes est plus difficile à établir sans doute parce que les repères topographiques sont plus diffus, l'amplitude de variation d'échelles de perception des phénomènes est plus vaste et la « granularité spatio-temporelle » se différencie davantage selon l'origine des données. Malgré cela, si les questions du temps et de l'espace sont transférables de l'urbain au rural, l'interprétation fonctionnelle ne l'est pas. Les choix inhérents à l'établissement d'un thésaurus posent plus de problèmes pour le milieu rural que pour la ville. Celui que nous utilisons (*infra*) n'est pas universel et définitif mais répond aux questions actuelles d'archéologie urbaine. Cette approche fonctionnelle n'est pas adaptée au monde rural.

2.2. Les dynamiques et la trajectoire

Les associations entre les trois ensembles caractérisent chacune une interaction (fonction-espace, fonction-temps, espace-temps ou encore fonction-espace-temps) à laquelle est associée un ou plusieurs thèmes de l'étude des dynamiques urbaines dans la longue durée (Tableau 1).

Associations	Dimension d'étude
F x E	Espace spécialisé déterminé par un usage : cloître canonial, aire funéraire, zone de production, port...
F x T	Fonction spécifique d'une temporalité donnée : domus, église paroissiale... Changement de fonction : emploi/réutilisation
E x T	Localisation spécifique d'une temporalité donnée : nécropole, système défensif... Mouvement : déplacement d'une fonction (baptistère, atelier monétaire...); morphologie : changement de forme (passage d'une chapelle à une basilique funéraire...); redistribution spatiale (réorganisation des bâtiments d'un couvent...).
F x E x T	Trajectoires des objets urbains, étude de l'espace urbanisé ancien et des dynamiques urbaines dans la longue durée.

Tableau 1.

L'étude des dynamiques urbaines est le produit de l'association des trois ensembles (F, E, T). La trajectoire des phénomènes étudiés est déterminée par leurs changements dans chacun de ces ensembles. Si l'on traduit chacun des trois ensembles comme une dimension, chaque changement sur l'un des axes traduit un changement d'objet urbain (Figure 2). La trajectoire représentée est celle du phénomène observé.

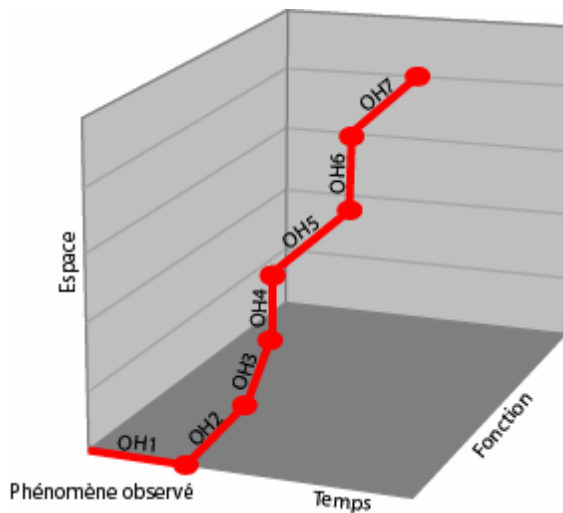


Figure 2. Trajectoire d'un phénomène urbain

Les changements dans les dimensions spatiales et fonctionnelles ne sont pas mesurables. Ces axes ne peuvent pas être gradués à l'inverse de celui du temps qui pourrait l'être. Par analogie, seules les ruptures et les continuités temporelles sont représentées, pas la mesure du temps. De cette manière, les points représentent une rupture dans l'une ou l'autre des trois dimensions et les lignes une continuité. L'objet urbain (OU) peut donc être défini comme un segment de la trajectoire du phénomène étudié, ou encore comme une continuité dans les trois dimensions spatiale, fonctionnelle et temporelle. Une rupture dans l'une au moins de ces dimensions implique le passage d'un objet urbain à un autre.

Prenez un exemple simple. Une *domus* gallo-romaine est l'OU1. Cette même *domus* réutilisée comme chapelle funéraire au 4^e siècle (OU2) constitue un changement fonctionnel. Son remplacement par une basilique funéraire (OU3) au 6^e siècle est un changement spatial et fonctionnel. La construction d'une basilique plus vaste (OU4) au 11^e siècle est une modification spatiale. L'installation d'un couvent (OU5) au 14^e siècle avec de nouveaux bâtiments est un changement spatial et fonctionnel. Le déplacement du couvent en un autre lieu au 16^e siècle est un changement spatial (OU6). Parallèlement, la réutilisation des bâtiments comme collège est un changement fonctionnel (OU7).

Dans la pratique, il est difficile d'imaginer une rupture temporelle qui ne soit pas déterminée par un changement spatial et/ou fonctionnel. Malgré tout, l'insertion d'un objet urbain existant dans un réseau d'autres objets semblables à un moment constitue bien un changement uniquement temporel sans affecté ni sa fonction ni sa spatialité (position et morphologie). C'est le cas, par exemple d'une église paroissiale précoce qui subit un changement de temporalité quand elle se trouve insérée dans la mise en place du maillage paroissial plus systématique.

Ce mode de représentation est fondé sur l'idée d'insérer le temps au centre de la problématique au même titre que l'espace. En cela, il se rapproche de la *time-geography* développée au début des années 70 (Chardonnel, 2001) dont le concept, volontairement dynamique est d'utiliser le temps et l'espace comme deux éléments de même nature et de même dimension. Cependant, notre approche se distingue largement de la *time-geography* pour deux raisons. La première porte sur les dimensions choisies pour chacun des axes. Dans le cas de la *time-geography*, la représentation de l'espace utilise un plan en deux dimensions et la troisième est réservée au temps. L'identification du phénomène représenté est fixe ; si l'on change d'objet (de fonction), on change de diagramme. Les trajectoires représentées traduisent la dynamique de l'objet observé dès lors qu'il s'agit d'un déplacement. En revanche, ce modèle est peu adapté à la prise en considération des changements morphologiques et/ou fonctionnels. La seconde porte sur l'objet même qui est représenté, nous utilisons ici un diagramme en trois dimensions pour illustrer la conception que nous donnons à la dynamique des phénomènes étudiés, pas pour tracer la trajectoire précise de chacun d'entre eux. Nous n'avons pas d'autre prétention, avec ce diagramme, que de formaliser les dimensions dans lesquelles nous souhaitons observer les trajectoires des phénomènes que nous étudions.

2.3. *Le processus*

L'identification d'un objet urbain se fonde sur une réflexion ou un processus circulaire par lequel chaque sous-système peut-être une clef d'entrée et/ou de modification et/ou d'enrichissement dans la définition de l'objet urbain et donc, du contenu de la base de données (Figure 3). La première étape est toujours la définition d'un cadre d'étude et d'analyse spatio-temporelle à partir duquel on fondera la résolution temporelle, spatiale et fonctionnelle. C'est le choix de l'échelle de perception du phénomène étudié (Saint-Gérand, 2005) ou encore, la notion de granularité spatio-temporelle (Langlois, 2005 : 311). A partir de ce cadre, on présume qu'est conçu le modèle hiérarchique fonctionnel ou thésaurus, définit comme un modèle pérenne, stable et robuste qui va permettre d'identifier les objets urbains par leur interprétation en entité fonctionnelle (EF). Inversement, la reconnaissance de nouveaux objets urbains complétera ce modèle hiérarchique. Puis, la définition des objets urbains et leur localisation associée à leur déconstruction se traduit sous la forme d'entité spatiale (ES). Ces ES composent l'Espace qui, par défaut peut rester vacant. Dans se processus l'Espace se définit comme non préétabli, redéfinissable, multiple et changeant, de fait il est dépendant de la construction ou déconstruction des objets urbains et de leur inscription dans le Temps. En effet, les entités temporelles (ET) vont dater les objets urbains et inversement les objets urbains vont « rythmer le Temps » : la sollicitation des ET sera différente selon les cas d'étude, ce qui met en évidence des accélérations ou décélérations du temps (notion de rythme). Il convient de préciser que le Temps est connu et continu, toutes les ET le composant sont prédéfinies (selon la résolution, granularité, choisie) même si elles ne seront pas toutes sollicitées.

Ce modèle du processus circulaire de réitération correspond à un niveau d'analyse. Ces niveaux d'analyse peuvent s'emboîter formant à chaque fois un modèle similaire mais à un niveau supra ou infra englobant ou englobé par un autre niveau. La répétition de ces emboîtements de niveaux se traduit par la définition d'objet spécifique à chacun d'entre eux (Tableau 2). Le passage de l'un à l'autre correspond systématiquement à un changement de résolution dans chacun des trois ensembles, fonction, espace et temps. Ainsi en archéologie urbaine on peut définir les principaux niveaux imbriqués tel des poupées gigognes (Figure 4).

Pour l'étude de la ville, la définition de l'objet urbain détermine les échelles fonctionnelles, spatiales et temporelles de l'analyse au sein d'une hyperclasse englobante : l'espace urbanisé ancien (Figure 3).

Objet	Exemple	Fonction	Espace	Temps
Unité stratigraphique	Première couche d'occupation à l'intérieur d'un bâtiment A	Occupation intérieure	Pièce X du bâtiment A	Datation relative par relation d'antéropostériorité
Fait	Mur du bâtiment B coupant le sol de la pièce X	Construction	Pièce Y du bâtiment B	Datation relative par relation d'antéropostériorité
Structure	Four à céramique dans la cour du bâtiment B	Production de céramique	Fouille de la rue du Commerce	Type Lezoux 4 (Période flavienne-début du 2 ^e siècle)
Élément constitutif	Atelier de potier	Artisanat, atelier	Parcelle, îlot	Période flavienne-début 2 ^e siècle
Objet urbain	secteur artisanal	Lieu de commerce, artisanat, production	Quartier de Tours	Seconde moitié du 1 ^{er} -première moitié du 2 ^e siècle
Espace urbanisé ancien	Caesarodunum, ville ouverte de l'Antiquité	Ville	Tours	1 ^{er} -3 ^e siècle
Aire chrono-culturelle	Les chefs-lieux de cités antiques	Réseaux de villes	Gaule	1 ^{er} -3 ^e siècle

Tableau 2.

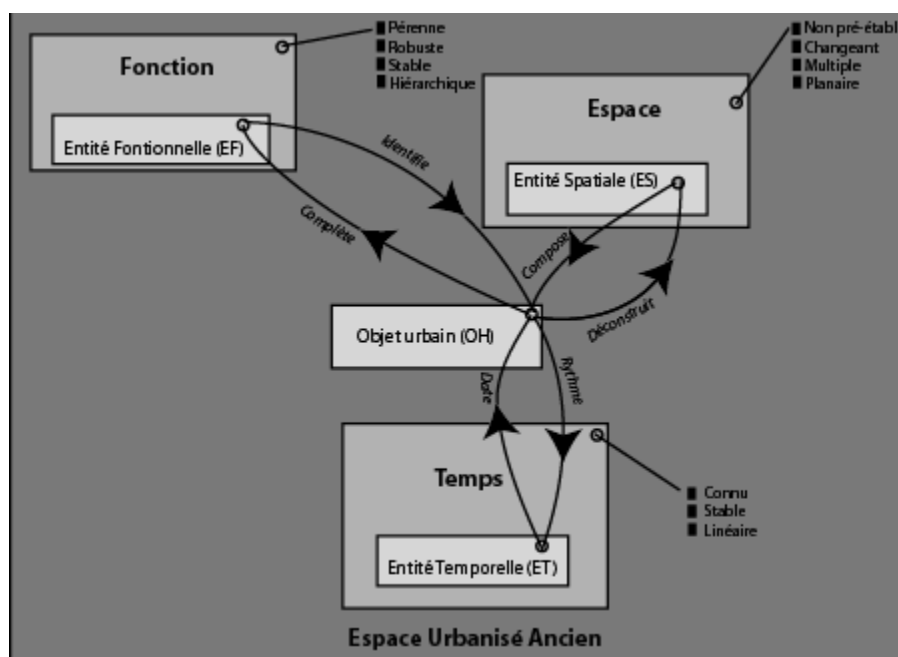


Figure 3. Le processus

Partant de ce processus représenté sous la forme d'un modèle global, il est nécessaire de décomposer et décrire chacune des hyperclasses, la Fonction, l'Espace et le Temps, fondées sur trois types d'objets simples, l'entité fonctionnelle (EF), l'entité spatiale (ES) et l'entité temporelle (ET).

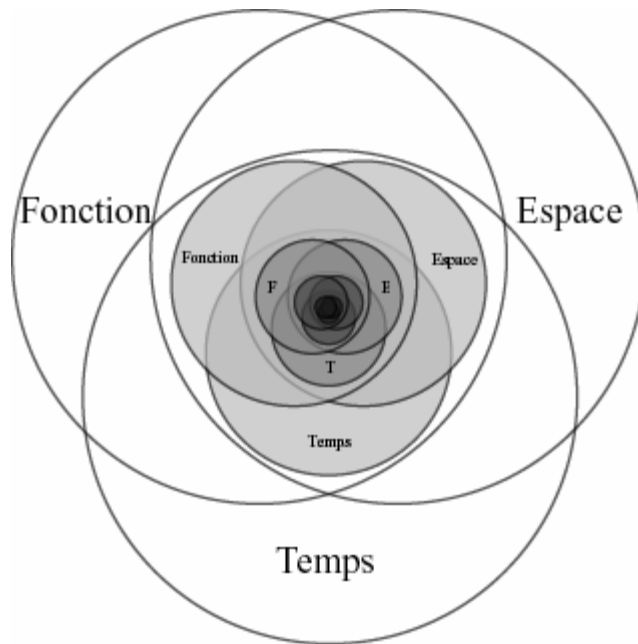


Figure 4. *Système d'analyse emboîté*

3. De la formalisation des entités fonctionnelles à la modélisation spatiale ¹

3.1. *L'inscription de l'entité fonctionnelle dans modèle hiérarchique*

Le recours à des systèmes d'information pour l'étude des villes dans la longue durée présente plusieurs avantages :

- le croisement d'informations et de sources qui sont par définition lacunaires et hétérogènes,
- l'évaluation de la documentation disponible,
- la représentation multiple d'une même réalité (Ruas, 2002).

1. Ce chapitre résume la première étape de notre réflexion, publié dans la revue *Histoire et mesure* (Galinié *et al.*, 2004)

L'élaboration de la documentation de référence passe par deux étapes. La première, d'ordre historique, est consacrée à la définition et à la formalisation des données topographiques, et la seconde, d'ordre géographique, à la modélisation spatiale de ces données.

Dans le domaine de la topographie urbaine étudiée dans la longue durée, les renseignements utiles, pour leur potentiel documentaire, proviennent de trois types de sources (Galinié, 2000 : 18-24 ; Galinié *et al.*, 2002) :

- les éléments matériels dans le sol ou en élévation,
- les mentions écrites,
- les représentations iconographiques.

De nombreux exemples de regroupements fonctionnels existent dans la bibliographie archéologique ou historique contemporaine, issue de la géographie urbaine (Heighway 1972 ; Van Es *et al.*, 1982 ; Lepetit, 1988). Nous utilisons celui élaboré et testé par le Centre National d'Archéologie Urbaine du ministère de la Culture qui a fait ses preuves depuis 1990, pour le traitement des

- | | |
|---|---|
| <p>1. Voirie, aménagements</p> <ul style="list-style-type: none"> 11. voies, rues 12. espaces libres 13. aménagement des berges 14. aménagements du relief 15. franchissements 16. adductions d'eau 17. collecteurs, évacuations 18. monuments, vestiges 19. édifice monumental indéterminé <p>2. Structures défensives et militaires</p> <ul style="list-style-type: none"> 21. système défensif urbain 22. structures fortifiées 23. garnisons, casernements <p>3. Constructions civiles</p> <ul style="list-style-type: none"> 31. espaces publics 32. pouvoir civil, justice 33. éducation, culture 34. santé 35. spectacles, sports 36. bains, thermes 37. habitat privé <p>4. Édifices religieux</p> <ul style="list-style-type: none"> 41. cultes païens 42. édifices cultuels catholiques 43. bâtiments conventuels ou monastiques 44. bâtiments ecclésiastiques | <ul style="list-style-type: none"> 45. cultes autres que catholiques 46. églises paroissiales <p>5. Lieux d'inhumation</p> <ul style="list-style-type: none"> 51. aire funéraire 52. cimetière paroissial 53. lieu d'inhumation particulier <p>6. Lieux de commerce, artisanat, production</p> <ul style="list-style-type: none"> 61. commerce, échanges, boutiques 62. artisanat, ateliers 63. agriculture, élevage 64. manufacture, établissement industriel 65. extraction, carrières <p>7. Formations naturelles</p> <ul style="list-style-type: none"> 71. littoral 72. cours d'eau (alluvions) 73. marécage 74. colluvionnements <p>8. Autres</p> <ul style="list-style-type: none"> 81. indéterminé 82. absence d'occupation attestée 83. abandon <p>9. Hors urbain</p> <ul style="list-style-type: none"> 91. établissement complexe sans caractère urbain 92. structure périphérique |
|---|---|

Tableau 3. Valeurs urbaine (1 à 9) et valeurs d'usage (11 à 92) d'après le thésaurus du CNAU

données topographiques des villes préindustrielles¹. L'interprétation fonctionnelle de chaque élément matériel est établie à deux niveaux : celui de la valeur d'usage et celui de la valeur urbaine (Tableau 3). Par exemple, une construction est interprétée comme un atelier (valeur d'usage) ; on en suppose l'existence d'un secteur artisanal et celle d'activités de production ou de transformation (valeur urbaine). Cette interprétation à deux niveaux correspond à un changement d'échelle (Boffet, 2002 : 229).

Nous retenons comme unité d'enregistrement pour l'analyse de l'organisation urbaine et de ses transformations dans la longue durée, l'entité fonctionnelle (EF), définie comme un élément topographique, anthropique ou naturel à la fonction exclusive, datée et localisée. Pour chaque EF, il faut procéder à :

- son individualisation au niveau pertinent selon l'objectif fixé et au degré de précision que permet l'état des connaissances ;
- la critique des différentes sources la renseignant ;
- l'établissement de sa localisation (le cas échéant de son emprise) et de sa durée d'usage.

L'individualisation de l'EF comme entité robuste est fondée sur des systèmes documentaires permettant, par leur confrontation, la transformation des sources en références. Dans la pratique, l'EF est au début et à la fin du processus. Présente, elle provient d'une source qui la fait apparaître dans la documentation et nécessite la mobilisation de tout ou partie des autres sources pour assurer sa robustesse topographique, chronologique et fonctionnelle.

3.2. L'entité spatiale comme élément du graphe planaire topologique

Une fois les données transformées en EF, datées et interprétées, il est encore nécessaire de les traduire en entités spatiales (ES). La modélisation spatiale proposée (Galinié *et al.*, 2004) est fondée sur le principe de la non redondance des entités. Elle consiste à distinguer d'une part les entités fonctionnelles (EF) comme des objets complexes archéologiquement interprétés, et d'autre part les entités spatiales (ES) en tant qu'objets simples, géométries localisées. Dans ce modèle, l'espace est continu. Il peut par endroit être vacant. En un lieu donné, il ne peut y avoir qu'une et une seule ES mais elle peut être utile à autant d'EF que nécessaire.

Le changement de perspective opéré en passant de l'EF à l'ES s'appuie sur une définition du lieu dont la fonction et le temps sont des attributs. L'espace est alors au cœur du modèle proposé et, de fait au centre des problématiques. Le raisonnement est fondé sur les types de modifications d'un lieu dans le temps (Figure 5) regroupés en trois catégories, modifications thématiques, spatiales et temporelles, inspirées de Lardon, Libourel et Cheylan (1999 : 51-52).

¹ Voir l'annuaire des opérations de terrain en milieu urbain 2005, en ligne sur le site du CNAU <http://www.culture.gouv.fr/culture/cnau/fr/index.html>

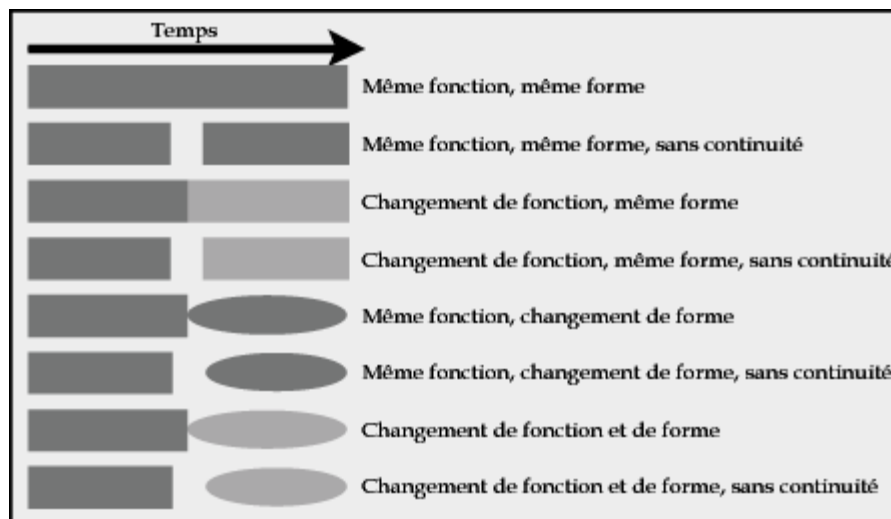


Figure 5. Types de modifications que peut subir un lieu dans le temps (Galinié et al. 2004)

La modélisation consiste à déconstruire l'information, quitte à aller à l'encontre de la perception synthétique que nous avons d'un lieu. Pour réaliser cette modélisation, on se base sur les deux notions d'objets simples et d'objets complexes. Ces deux notions se réfèrent à la modélisation HBDS (Hypergraph Based Data Structure) (Bouillé, 1977 ; Saint-Gérard, 2005). Sans trop détailler ce type de modélisation, cette méthode regroupe quatre éléments fondamentaux, utiles pour lire la Figure 6 :

- La classe : c'est un ensemble d'objets ayant les mêmes caractéristiques (valuations). Ces objets seront dits « simples ». Elle est représentée par une ellipse.
- L'hyperclasse : c'est un ensemble d'une ou plusieurs classes. Ses objets sont dits « complexes ». Sa figuration est identique.
- Les valuations : elles caractérisent la classes ou ensemble d'objets. Elles sont figurées par des carrés reliés à la classe.
- Les liens : ils matérialisent les relations topologiques entre les classes d'objets et/ou les hyperclasses. Ils sont représentés par une ou plusieurs flèches. Chaque lien ou hyperlien est porteur de valuation.
- Les hyperliens : c'est un ensemble de liens de nature similaire.

L'objet simple possède une géométrie propre alors que l'objet complexe n'en possède pas, il est composé de plusieurs objets simples. Selon cette modélisation, plusieurs objets complexes peuvent former d'autres objets complexes.

Dans le cas de l'information historique, nous pouvons considérer que le lieu est un objet complexe composé de plusieurs objets simples formant la classe des ES, ou Entités Spatiales. Seules ces dernières auront une géométrie (Figure 6).

Une ES ou une association d'ES définira une EF à un moment donné (fourchette chronologique/datation/etc) pour une ou des fonctionnalités précises. Les attributs de datation et/ou de fonction deviennent par conséquent des attributs de la relation entre le lieu et les objets qui le composent, cette relation étant caduque sans au moins un attribut. Et une EF ou une association d'EF composera un lieu.

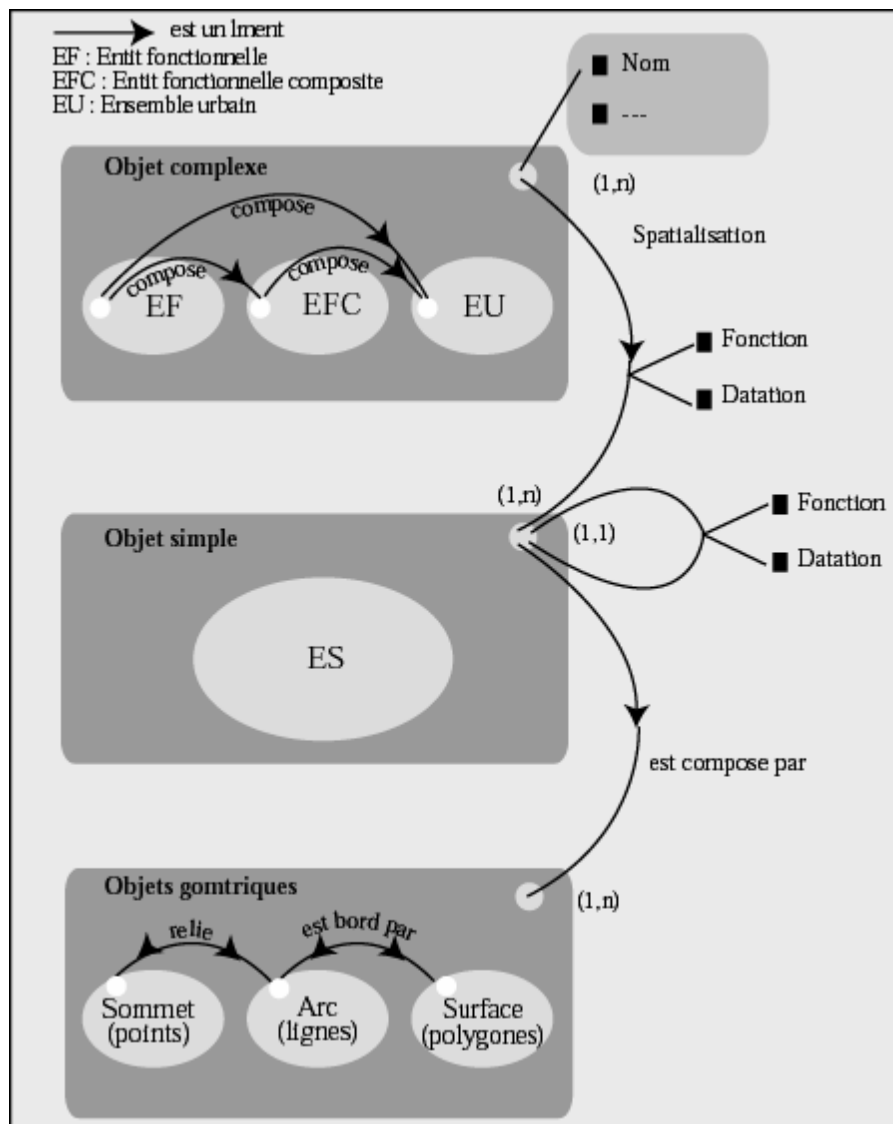


Figure 6. Modélisation spatiale d'une EF (Galinié et al. 2004)

Une EF pourra être composée d'une ou plusieurs ES. Une ES pourra appartenir à une ou plusieurs EF. De même, grâce aux emboîtements possibles, un lieu pourra être composé d'une ou plusieurs EF et une EF appartiendra à un lieu et un seul.

La Figure 7 détaille cette démonstration à partir d'un exemple-type représentant une succession de transformations dont existent de nombreux exemples dans les villes de France, selon des modalités variées.

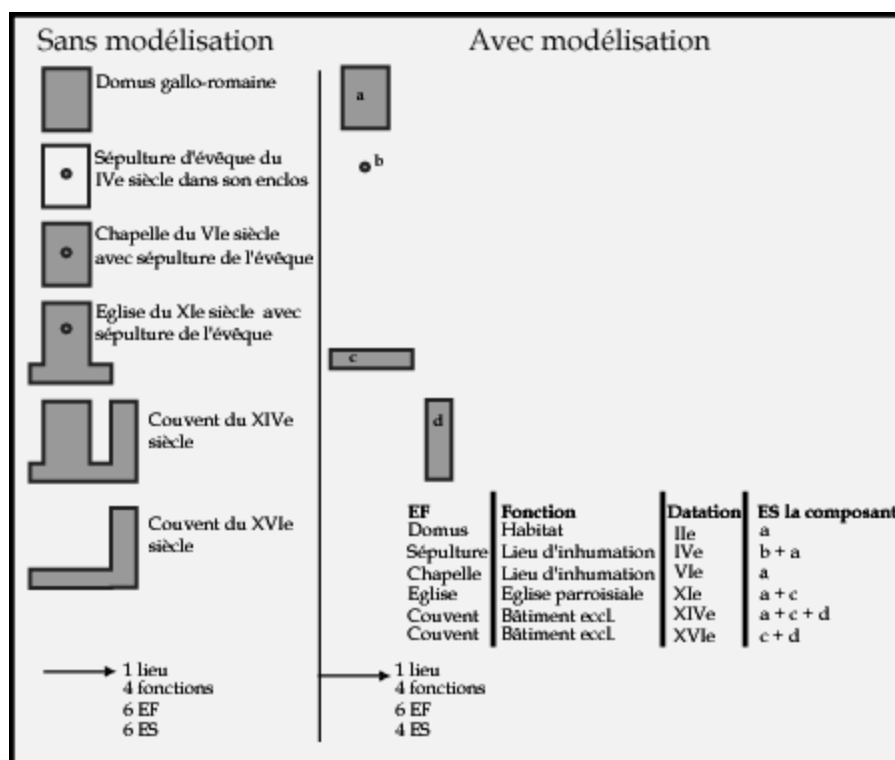


Figure 7. Exemple de conversion d'EF en ES (Galinié et al. 2004)

L'objectif de la modélisation proposée est de créer des entités spatiales en fonction de leur évolution morphologique, et non selon leur définition fonctionnelle. Ceci oblige à découper ou « déstructurer » le lieu en différents ou multiples objets (ES) qui ne sont pas définis par une datation et/ou une fonction. Dans notre exemple, les ES créées correspondent à des réalités spatiales, à des formes bien matérialisées et bien localisées qui prendront une signification historique détaillée grâce à leurs associations spatio-temporelles successives en EF.

Ainsi, on constate que la création d'une ES relève de l'aspect temporel des éléments caractérisant un lieu : ce dernier est scindé en autant d'ES que de « structures » identifiables qui apparaissent ou disparaissent.

Ce découpage reflète une réalité spatiale (apparition, stabilité, disparition) dans le temps et non pas une réalité fonctionnelle. Celle-ci est obtenue grâce aux « jeux » des relations et des attributs entre chacune des ES qui vont former des objets complexes (ici dans notre exemple des EF).

La difficulté liée à cette déstructuration des EF est de s'affranchir de la valeur interprétative historique au moment de définir les ES.

Cette proposition est appliquée dans le cadre d'une thèse en cours sur la formation et la transformation du tissu urbain d'un quartier de Tours du 5^e au 18^e siècle (Lefebvre, 2006).

4. Modélisation temporelle

La démarche que nous avons suivie, nous a amené d'une approche fonctionnelle à une approche spatiale. Ainsi, dans le modèle de données que nous avons proposé, la localisation est une propriété des ES ; la fonction participe intrinsèquement à la définition des EF mais elle est affectée comme attribut du lien entre EF et ES ; le temps est un attribut qui qualifie le lien entre EF et ES. Il nous semble maintenant opportun d'examiner une approche temporelle ou plus précisément d'élaborer un modèle de données permettant d'entrer dans l'analyse aussi bien par la fonction, l'espace ou le temps.

D'une manière générale, dans le meilleur des cas, le temps contribue à l'analyse et à l'explication des phénomènes spatiaux étudiés malgré la nécessité bien identifiée d'envisager une conception relative de l'espace intégrant le temps (Pumain, 1993 : 155-156). Quand les phénomènes sont abordés sous un aspect spatio-temporel, le temps est un des éléments qui structurent l'espace. C'est cette démarche qui est mise en œuvre pour l'explication des processus, des trajectoires, des dynamiques, le plus souvent dans des études portant sur un temps court. La prise en compte du temps est alors tellement liée à l'espace que la question de sa propre modélisation ne se pose pas. L'omniprésence du temps dans les phénomènes étudiés constitue même un frein à sa formalisation et à sa modélisation dans nos disciplines. Les archéologues ont peu formalisé leur approche temporelle au-delà de l'échelle de la fouille et des questions de datation. Il faut bien entendu citer la *Harris Matrix* pour l'analyse stratigraphique (Harris, 1975), récemment revisitée à l'aide de la théorie des graphes (Desachy, 2005). L'étude du mobilier archéologique, les objets et surtout la céramique, a donné lieu à de nombreuses chronotypologies (Husi, 2003). Les travaux récents sur la datation des artefacts (Olivier, 2001 ; Wirtz *et al.*, 2003) ou encore celle des contextes archéologiques selon une approche statistique (Bellanger *et al.*, 2006 a et b) montrent la difficulté de l'établissement des

chronologies archéologiques. En revanche, les formalismes de représentation et de raisonnement sur l'espace et le temps développés dans le domaine de l'intelligence artificielle (Le Ber *et al.*, 2007) n'ont pas eu d'écho en archéologie.

Notre propos est de considérer le temps comme une entité spécifique au même titre que l'espace et la fonction. Nous proposons de construire un modèle propre au temps qui doit ensuite permettre, en l'associant à ceux que nous utilisons pour l'espace et l'interprétation fonctionnelle, d'aborder les phénomènes que nous étudions selon un point de vue aussi bien spatio-temporel que temporo-spatial. Ce nouveau changement de perspective qui distingue le temps de l'espace, nous 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. L'entrée se fait alors par l'objet d'étude et non par l'une de ses caractéristiques, la fonction, le temps ou l'espace.

Si notre objectif, ou notre ambition, est de travailler sur les héritages, les inerties, les trajectoires et les dynamiques dans la longue durée, il faut donc considérer le temps pour lui-même et non plus comme affecté aux objets spatiaux.

La modélisation nous a conduit à séparer les objets simples (ES) des objets complexes (EF) et à affecter le temps et la fonction comme attributs de la relation entre les deux. Cela constitue un progrès par rapport au modèle plus couramment utilisé, fondé sur la notion « d'espace support » (Pumain, 1993 : 137-139) sur lequel sont organisées les activités humaines. Dans ce cas le temps et la fonction sont des attributs des EF sans distinction entre EF et ES, ce qui génère beaucoup de redondances spatiales. La modélisation en EF et ES implique malgré tout que le temps et la fonction soient assujettis à l'espace. Il nous semble que la construction d'un système d'information spatio-temporel nécessite de commencer par dissocier les trois éléments, information, espace et temps, afin de définir d'abord chacun d'eux puis leur association. Il s'agit de définir un modèle spécifique à chacun de ces trois ensembles avant de proposer un modèle global.

Dans la première partie nous avons défini l'objet urbain (OU) comme notre objet d'étude. Selon le processus décrit (Figure 3), il est constitué par l'association d'une EF, d'une ES et d'une ET. L'EF prend donc ici un sens plus strictement limité à la fonction.

4.1. Modélisation de la fonction

La fonction est organisée selon le modèle arborescent du thésaurus hiérarchisé tel que nous l'avons exposé pour les EF (Tableau 3). La résolution du thésaurus par une hiérarchisation à trois niveaux (valeur urbaine, valeur d'usage, description) est fondée sur l'échelle de perception envisagée. Les occurrences du thésaurus sont limitées aux réalités de l'aire chrono-culturelle étudiée. Il est néanmoins élaboré pour la recouvrir très largement. Toutes les occurrences ne sont pas nécessairement sollicitées.

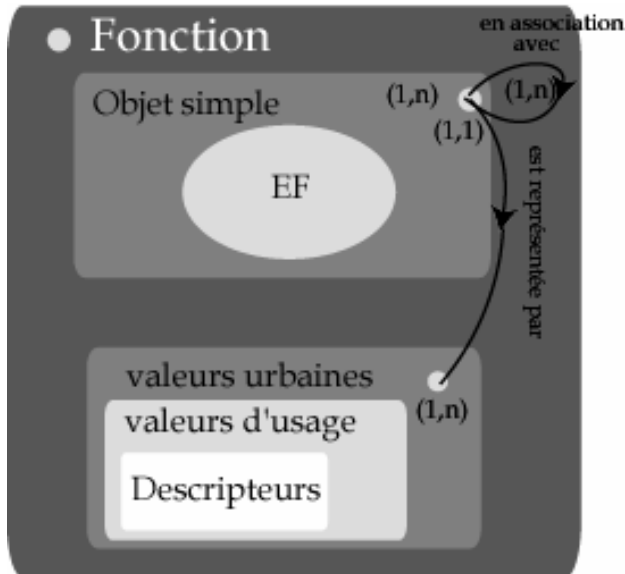


Figure 8. Modèle de la Fonction

4.2. Modélisation spatiale

L'espace est l'ensemble le plus formalisé des trois. Dans les SIG, l'espace est structuré sur le modèle d'un graphe planaire topologique sans isthme dans lequel s'inscrivent les ES. Les ES sont créés selon la définition des objets urbains. L'espace est continu, limité par la définition d'une zone d'étude. Il contient des vides ou des espaces vacants qui sont la soustraction des ES de la zone d'étude.

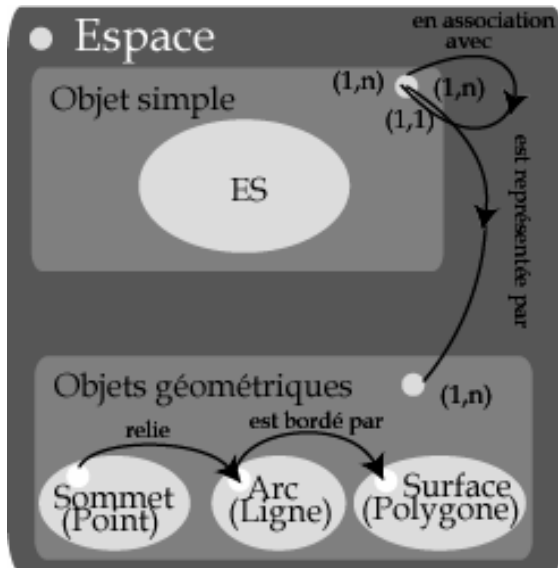


Figure 9. Modèle pour l'Espace

4.3. Modélisation temporelle

Le temps, toujours considéré comme continu et linéaire, n'a pas fait l'objet, pour les systèmes d'information, de modélisation spécifique. Nous proposons de modéliser le temps par analogie à l'espace.

Quels que soient les objectifs de la modélisation et l'échelle d'analyse considérée, dès lors qu'il s'agit de données historiques, le temps est le paramètre essentiel. Or, tant qu'il est cantonné au rôle d'attribut, il ne peut pas être mobilisé de manière globale mais seulement propre à chaque classe d'entités et répété pour chacune d'entre elles. Il convient donc de considérer le temps comme une classe d'entités à part entière. Pour cela, il faut définir une entité temporelle (ET) neutre et définie par la plus petite unité de temps utile à la datation du phénomène étudié. Cette proposition est construite de manière théorique en distinguant les objets simples et les objets complexes par analogie avec les ES et les EF. Dans sa plus simple expression, l'ET est assimilable à la notion de « date ».

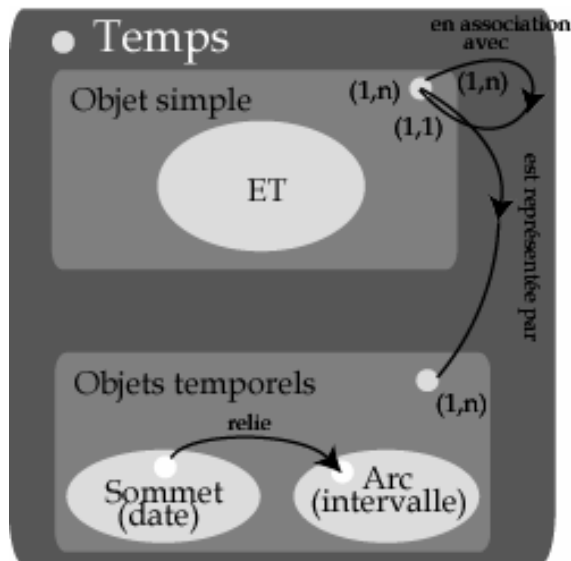


Figure 10. *Modèle pour le Temps*

Nous considérons ici qu'il ne doit pas y avoir de redondance temporelle. Comme l'espace, le temps est continu. Il peut par moment ne pas être utilisé. A un instant donné, il ne peut y avoir qu'une et une seule ET mais elle peut être utile à autant d'objets urbains que nécessaire. La résolution temporelle choisie pour les ET détermine la datation des objets urbains. Le temps continu est limité par les bornes chronologiques de l'objet d'étude. Les ET appartiennent donc à un ensemble dont le

nombre d'éléments est connu. Les ET sollicitées par les objets urbains constituent un sous-ensemble dont la soustraction de l'ensemble des ET révèle les vides temporels.

Le modèle du temps est linéaire et, comme pour l'espace, topologique. Ici, le temps est assimilé à un espace et à une dimension. Selon la modélisation HBDS, nous définissons une hyperclasse « temps ». Elle est composée des entités temporelles, objets simples, représentées par des dates et des intervalles. Cette formalisation du temps en instants et intervalles, est celle que décrivent Philippe Muller et Vincent Dugat (2007 : 34-35). En revanche, nous proposons ici de déconstruire le temps en autant d'ET que nécessaire pour la constitution des objets urbains (Figure 11).

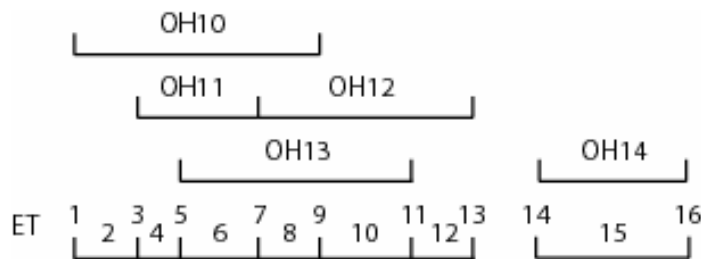


Figure 11. Déconstruction du temps en ET

Les relations topologiques entre les intervalles temporels ont été formalisées en intelligence artificielle par Allen (1984). Cet algèbre est le plus utilisé (Peuquet, 1994 : 454-455 ; Lardon *et al.*, 1999 : 48-49 ; Muller *et al.*, 2007 : 39). Nous ne retenons que quatre des treize relations d'Allen mentionnées par Muller et Dugat (2007 : 39) en bornant les intervalles par des dates comme ils le proposent également (Muller *et al.*, 2007 : 43). Nous éliminons toutes les formes d'intersection entre deux intervalles afin de ne retenir pour nos ET que les relations suivantes :

- $<(X,Y)$: X before Y
- $>(Y,X)$: Y after X
- $m(X,Y)$: X meets Y
- $mi(Y,X)$: Y met by X

Ainsi il n'y a plus de redondance temporelle et dès lors, toutes les notions de durée, siècle, période peuvent être recomposées à partir de ce modèle. A l'instar des ES, les ET sont déconnectées de l'interprétation fonctionnelle et spatiale. La durée et le nombre d'ET pour une période de temps déterminent une fréquence. Pour autant, la distribution des ET dans le temps n'est pas nécessairement cyclique. L'observation de cette distribution doit permettre l'analyse des rythmes.

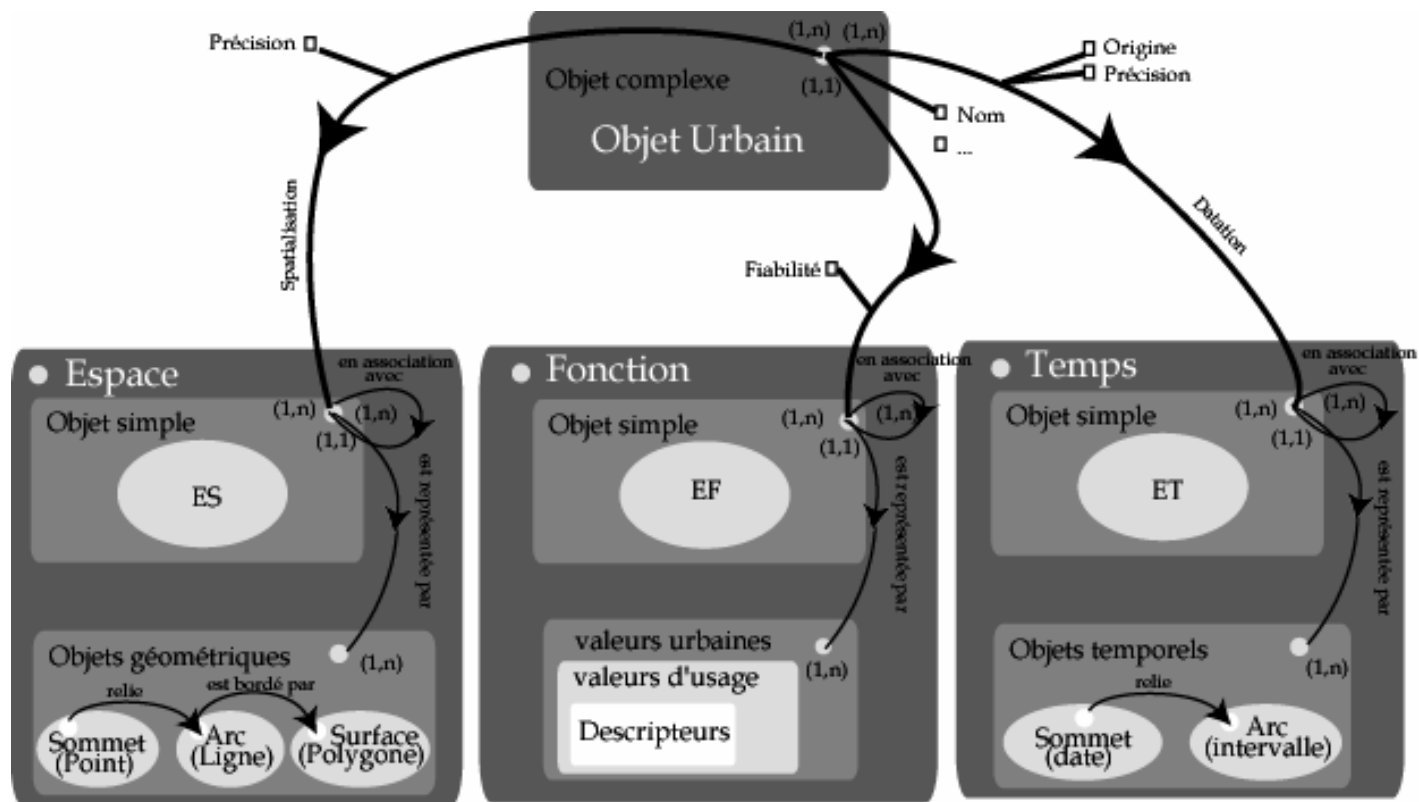


Figure 12. *Modèle global*

4.4. *Modèle global*

L'organisation de ces trois propositions autour de l'objet urbain constitue le modèle global de l'espace urbanisé ancien pour l'étude de la ville dans la longue durée.

Les relations entre les hyperclasses fonction, espace et temps avec celle de l'objet urbain déterminent respectivement son interprétation, sa localisation et sa datation. Les attributs de ces relations permettent de les qualifier : fiabilité de l'interprétation, précision de la localisation, origine et précision de la datation.

Même s'il n'y a pas de résolution prédéfinie pour l'espace comme pour le temps et si l'ensemble des fonctions n'est pas fini (le thésaurus peut toujours être augmenté), l'échelle de perception choisie pour les phénomènes étudiés fixe malgré tout une échelle pour chacun des ensembles.

Cette organisation permet, d'une part, de placer l'objet urbain au centre du modèle en interaction avec ses trois composantes et, d'autre part, de rendre indépendant la fonction, l'espace et le temps. Elle traduit notre approche d'archéologues à laquelle il manque la formalisation dans un langage mathématique plus strict. En nous inscrivant dans une démarche systémique telle que Patrice Langlois la décrit (2005 : 304-305), nous avons le sentiment d'avoir progressé dans la formalisation théorique en argumentant le passage du système observé au système théorique. Il reste à aborder la modélisation informatique pour passer au système technologique avant de pouvoir envisager la confrontation des simulations au réel.

5. Conclusion : Du modèle à l'analyse

L'objectif de la formalisation conceptuelle est d'aboutir à des analyses et des modèles de données permettant de faire progresser la compréhension des phénomènes observés. En construisant la modélisation temporelle par analogie à la modélisation spatiale, nous sous-entendons que l'analyse temporelle s'appuie sur des concepts semblables à ceux de l'analyse spatiale selon les équivalences suivantes :

Concepts de l'analyse spatiale	Concepts de l'analyse temporelle
Localisation	Datation
Distance	Durée
Position relative	Datation relative
Interaction spatiale	Interaction temporelle

Pour autant, les modèles d'analyse des interactions temporelles restent à écrire. En effet, si des modèles géographiques d'interactions spatiales ont été utilisés pour traiter des données archéologiques (Nuninger *et al.*, 2006), il n'y a pas d'équivalent pour les interactions temporelles. Or, l'analyse de ces interactions offrirait une lecture des rythmes et permettrait de mettre en évidence les accélérations et les décélérations, contractions et dilatations temporelles, observées empiriquement par les archéologues. L'identification de ces rythmes traduirait vraisemblablement l'état des connaissances en mettant en exergue les effets de sources. Cependant, cela offrirait également la possibilité de focaliser les observations sur la transition d'un état à un autre, c'est-à-dire de s'intéresser au changement d'état plutôt qu'aux états eux-mêmes.

Remerciements

Nous tenons à remercier Françoise Pirot (CNRS – UMR 8564 CEIAS – Centre de Ressources Numériques M²ISA – MSH Paris) ainsi que Henri Galinié et Elisabeth Zadora-Rio (CNRS – UMR 6173 – LAT, CITERES) de leur aide à la rédaction de cet article.

6. Bibliographie

- Allen J. F., Towards a General Theory of Action and Time, *Artificial Intelligence*, vol. 23, issue 2, 1984, p. 123-154.
- Bellanger L., Husi P., Tomasone R., Une approche statistique pour la datation de contextes archéologiques, *Revue de Statistique Appliquée*, 2006, LIV (2), p. 65-81.
- Bellanger L., Husi P., Tomasone R., Statistical aspects of pottery quantification for the dating of some archaeological contexts, *Archaeometry*, 2006, 48, 1, p. 169-183.
- Boffet A., L'analyse des villes in Ruas A. (dir.), *Généralisation et représentation multiple*, Paris, Hermès, 2002, p. 225-240.
- Bouillé F., Un modèle universel de banque de données simultanément partageable, portable, répartie. Thèse d'Etat es sciences, Université de Paris VI, Paris, 1977.
- Chardonnel S., La time-geography : les individus dans le temps et dans l'espace in Sanders L. (dir.), *Modèles en analyse spatiale*, Paris, Hermès, 2001, p. 129-156.
- Desachy B., Du temps ordonné au temps quantifié : application d'outils mathématiques au modèle d'analyse stratigraphique d'Edward Harris, *Bulletin de la Société préhistorique française*, 2005, tome 102, n° 4, p. 729-740.
- Egenhofer J. M., Golledge G R., *Spatial and Temporal Reasoning in Geographic Information*, University Press, Oxford, 1998.

- Galinié H., *Ville, espace urbain et archéologie*, coll. Sciences de la Ville n° 16, MSH Villes et territoires, Tours, 2000.
- Galinié H., Rodier X., ToToPI, un outil d'analyse urbaine, *Les petits cahiers d'Anatole* n° 11, 2002, http://www.univ-tours.fr/lat/pdf/F2_11.pdf.
- Galinié H., Rodier X., Saligny L., Entités fonctionnelles, entités spatiales et dynamique urbaine dans la longue durée, *Histoire & Mesure*, vol. XIX, n° 3/4, Paris, CNRS, 2004, p. 223-242.
- Heighway C., *The erosion of history*, Londres 1972.
- Husi P. (dir.), *La céramique médiévale et moderne du Centre-Ouest de la France (11^e-17^e s.), chrono-typologie de la céramique et approvisionnement de la vallée de la Loire moyenne*, 20^e supplément à la Revue archéologique du Centre de la France, FERAC, Tours, 2003.
- Langlois P., Complexité et systèmes spatiaux, in Guermont Y. (dir.), *Modélisations Géographiques*, Traité IGAT, Hermès, Paris, 2005.
- Lardon S., Libourel T., Cheylan J.-P., Concevoir la dynamique des entités spatio-temporelles, in Représentation de l'espace et du temps dans les SIG, *Revue internationale de géomatique* 9, 1999, p. 45-65.
- Le Ber F., Ligozat G., Papini O. (dir.), *Raisonnements sur l'espace et le temps : des modèles aux applications*, Traité IGAT, Hermès, Paris, 2007.
- Lefebvre B., Construction et déconstruction de l'espace urbain : une modélisation en volume du bâti ancien, *MIA Journal*, vol. 0, n°2, VII 2006, <http://www.map.archi.fr/mia/journal/>
- Lepetit B., *Les villes dans la France moderne (1740-1840)*, Paris, 1988.
- Muler P., Dugat V., Représentation en logique classique, in Le Ber F., Ligozat G., Papini O. (dir.), *Raisonnements sur l'espace et le temps : des modèles aux applications*, Traité IGAT, Hermès, Paris, 2007, p. 33-70.
- Nuninger L., Sanders L. *et al.*, La modélisation des réseaux d'habitat en archéologie : trois expériences, *M@ppemonde*, n° 83 (3-2006), <http://mappemonde.mgm.fr/num11/articles/art06302.html>
- Olivier L., Temps de l'histoire et temporalités des matériaux archéologiques : à propos de la nature chronologique des vestiges matériels, *Antiquités nationales*, 33 (2001), 202, p. 189-201.
- Ott T., Swiaczny F., *Time-Integrative Geographic Information Systems, Management and Analysis of Spatio-Temporal Data*, Springer, Berlin, 2001.
- Panopoulos G., Stamatopoulos A., Kavouras M., Spatio-temporal generalization : the chronograph application, actes 21st International Cartographic Conference, Durban, South Africa, 10-16 August 2003, http://ontogeo.ntua.gr/publications/icc2003_panopoulos_etal.pdf.
- Pelle S., *Modéliser des données géographiques grâce à la méthode HBDS*, ENSG, IGN, 2001, <http://www.ensg.ign.fr/~spelle/HBDSConseils.htm>

- Peuquet D. J., It's about time ; A conceptual framework for the representation of temporal dynamics in geographic information systems, *Annals of the Association of the American Geographers*, n° 3, 1994, p. 441-461.
- Pumain D., L'espace, le temps et la matérialité des villes, in Lepetit B., Pumain D. (dir.), *Temporalités urbaines*, coll. « Villes », Anthropos, Paris, 1993, p. 135-157.
- Rodier X., Galinié H., Figurer l'espace/temps de Tours préindustriel : essai de chronochorématique urbaine, *M@ppemonde*, n°83 (3-2006),
<http://mappemonde.mgm.fr/num11/articles/art06303.html>
- Ruas A. (dir.), *Généralisation et représentation multiple*, Paris, Hermès, 2002.
- Saint-Gérard T., Comprendre pour mesurer...ou mesurer pour comprendre ?, in, Guermont Y.dir., *Modélisations Géographiques*, Traité IGAT, Hermès, Paris, 2005.
- Thériault M. & Claramunt C., La représentation du temps et des processus dans les SIG : une nécessité pour la recherche interdisciplinaire, in Représentation de l'espace et du temps dans les SIG, *Revue internationale de géomatique* 9, 1999, p. 67-99.
- Van Es W., Poldermans J., Sarfatij H., Het bodemarchief bedreigd : archeologie en planologie in de binnensteden van Nederland, Amersfoort 1982.
- Wirtz B., Olivier L., Recherches sur le temps archéologique : l'apport de l'archéologie du présent, *Antiquités nationales*, 35 (2003), p. 255-266.