



HAL
open science

Modélisation de la gestion de l'eau : approches conceptuelles et méthodologiques en vue de l'implémentation d'un modèle de système d'information géographique et géoarchéologique

Françoise Pirot, Véronique Brouquier-Reddé, Elsa Rocca, Cyril Castanet, Stéphane Desruelles, Éliane Lenoir, Rachid Ragala

► To cite this version:

Françoise Pirot, Véronique Brouquier-Reddé, Elsa Rocca, Cyril Castanet, Stéphane Desruelles, et al.. Modélisation de la gestion de l'eau : approches conceptuelles et méthodologiques en vue de l'implémentation d'un modèle de système d'information géographique et géoarchéologique. Véronique Brouquier-Reddé, Frédéric Hurlet. L'eau dans les villes du Maghreb et leur territoire à l'époque romaine, 54, Ausonius Editions, pp.85-101, 2018, Mémoires, 9782356132307. halshs-02068589

HAL Id: halshs-02068589

<https://shs.hal.science/halshs-02068589v1>

Submitted on 2 Sep 2022

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.

Modélisation de la gestion de l'eau : approches conceptuelles et méthodologiques en vue de l'implémentation d'un modèle de système d'information géographique en géoarchéologie

Françoise Pirot, Véronique Brouquier-Reddé, Elsa Rocca,
Cyril Castanet, Stéphane Desruelles, Éliane Lenoir, Rachid Ragala*

L'un des volets du programme *EauMaghreb* de l'Agence Nationale de la Recherche¹ a eu pour ambition de travailler sur les ressources en eau et leur gestion dans le Maghreb antique en s'appuyant sur un système d'information géographique, grâce à une étroite collaboration entre géographes et archéologues². Sur le plan méthodologique, la conception, la création puis l'implémentation d'un système d'information géographique (SIG) ne se limitent pas à l'utilisation d'un logiciel dit de SIG, à la mise en œuvre de techniques plus ou moins complexes, à la juxtaposition et à la superposition de données existantes qu'elles soient créées ou dérivées³. Il s'agit d'un travail collaboratif entre thématiciens et géomaticiens qui exige une réflexion conceptuelle visant à une modélisation spatiale abstraite d'une réalité complexe pour répondre à une problématique.

Dans le cas du programme *EauMaghreb*, l'objectif était de mieux connaître les besoins en eau et son exploitation à l'époque romaine en mettant en relation l'inventaire des aménagements hydrauliques avec le bilan des ressources hydrologiques, des conditions environnementales et des dynamiques géomorphologiques. Il s'agit aussi d'apprécier les rapports entre ces milieux physiques et l'occupation humaine dans l'Antiquité, ainsi que les risques liés à l'eau. Couvrant la Tunisie, l'Algérie et le Maroc, le programme s'ancrait sur les travaux de terrain des équipes archéologiques partenaires, en particulier sur les sites d'Haïdra⁴, Lambèse⁵, *Banasa*⁶ et *Volubilis*⁷. Ce dernier site, pour lequel les structures hydrauliques étaient les mieux connues, et la région du nord-ouest du Maroc, bien documentée grâce aux prospections dans le bassin du Sebou⁸ ou du territoire de *Zilil*⁹, ont servi de zones-test pour développer le système d'information géographique.

Cet article met en avant l'intérêt d'aborder la création d'un système d'information géographique par une approche modélisatrice, en détaillant la démarche méthodologique et le processus de conception du SIG *EauMaghreb*. L'un des enjeux du projet était d'intégrer, de façon conjointe et équilibrée, des données hétérogènes issues d'études pluridisciplinaires pour répondre à des problématiques environnementales et historiques. Un autre enjeu était la variété et les emboîtements d'échelles :

1. CSD9 - Sciences humaines et sociales Projet 07-BLAN-10372. Ce travail a été également réalisé avec le soutien du laboratoire d'excellence TransferS (programme Investissements d'avenir ANR-10-IDEX-0001-02 PSL* et ANR-10-LABX-0099) de l'ENS-Collège de France et université Paris Sciences & Lettres.

2. Équipes-partenaires 1 (Orient et Méditerranée, UMR 8167), 2 (AOrOc, UMR 8546) et 3 (ENEC, UMR 8185 ; CEIAS, UMR 8564). Voir Ragala *et al.* sous presse.

3. Données dérivées : données géospatiales correspondant aux résultats de géotraitements et de calculs.

4. Mission archéologique franco-tunisienne d'Haïdra, Tunisie, co-dirigée par F. Baratte et F. Béjaoui, Orient et Méditerranée – université Paris-Sorbonne - CNRS / Institut national du patrimoine, Tunisie (INP).

5. Mission archéologique franco-algérienne de Lambèse, Tazoult, Algérie, dirigée par A.-A. Malek, AOrOc-CNRS-ENS-PSL / Centre national de la recherche en archéologie, Algérie (CNRA).

6. Équipe franco-marocaine co-dirigée par R. Arharbi et É. Lenoir, Ministère de la Culture du Maroc - INSAP / AOrOc-CNRS-ENS-PSL.

7. Citons les recherches de l'Institut national des sciences de l'archéologie et du patrimoine, Maroc (INSAP) et les fouilles menées en coopération par les membres du partenaire 2 (thermes du Nord : É. Lenoir ; sanctuaires : V. Brouquier-Reddé, A. El Khayari, A. Ichkhakh).

8. Mission de prospection du Bassin du Sebou, co-dirigée par R. Rebuffat, A. Akerraz et H. Limane - INSAP / AOrOc CNRS-ENS, cf. Akerraz *et al.* 1995 ; Rebuffat 2011 ; Rebuffat *et al.*, éd. 2011 ; Akerraz *et al.*, éd. 2012.

9. Prospection autour de *Zilil*, co-dirigée par N. El Khatib-Boujibar et M. Lenoir - INSAP / AOrOc-CNRS-ENS, cf. Lenoir M. 1993.

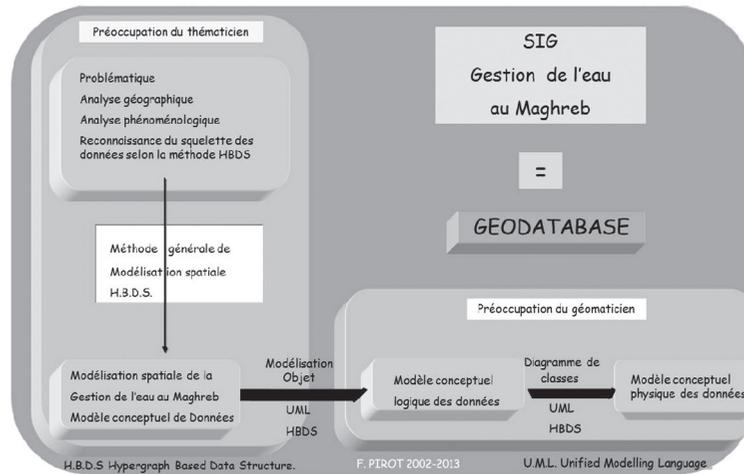


Fig. 1. Démarche méthodologique en vue de la conception et de l'implémentation d'un Système d'Information Géographique.

du supra-régional (le nord-ouest du Maroc correspond à la province romaine de Maurétanie tingitane et inclut une grande partie du bassin-versant de l'oued Sebou) à la structure ou même à l'objet archéologique, en passant par l'échelle micro-régionale (le bassin-versant de l'oued Khoumane) et urbaine (le site de *Volubilis*)¹⁰.

La démarche méthodologique adoptée se décline en cinq étapes qui correspondent aux différents niveaux de modélisation¹¹ (fig. 1) :

- conception du système d'information géographique : modélisation spatiale de la réalité complexe ;
- élaboration du Modèle Conceptuel de Données : reconnaissance du squelette des données selon la méthode de modélisation Hypergraph Based Data Structure (HBDS) ;
- réalisation du Modèle Logique de Données : modélisation orientée objet Unified Modeling Language (UML) et/ou HBDS ;
- production du Modèle Physique de Données : création et implémentation de la *géodatabase* topologique ;
- création des objets géographiques : création des données géospatiales et aspatiales.

LA CONCEPTION DU SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

La modélisation spatiale¹² permet de prendre en compte une partie du monde réel en fonction d'une problématique, d'hypothèses, d'un objectif et d'une application donnée en vue de la structuration de l'information géographique. Les méthodes mises en œuvre pour réaliser cette modélisation sont fondées sur des analyses géographiques fines des phénomènes spatiaux¹³. Cette première étape est réalisée par les thématiciens. Dans le cas du programme ANR *EauMaghreb*, les archéologues et les géographes ont, ensemble, analysé, puis décomposé les paramètres environnementaux et archéologiques nécessaires à la compréhension des processus de gestion de l'eau au Maghreb. Cette étape impose, au préalable, la formulation par les différents partenaires d'un certain nombre de questions et de problématiques concernées par le SIG :

- quelle est l'étendue géographique globale de la zone d'étude, en longitude et en latitude, et quels sont les niveaux de granularité, c'est-à-dire les changements d'échelle ?

10. Desruelles *et al.* 2012 ; *Eid.*, voir dans ce volume, infra 103-118.

11. Molenaar 1998 ; Pirot & Saint Gérard 2005 ; Pirot *et al.* 2006 ; Labarthe & Pirot 2008 ; Pirot 2011 ; *Ead.* 2012 ; Raper 2000.

12. Molenaar 1998 ; Raper 2000.

13. Chorley & Haggett 1967.

- quels sont les constituants de l'espace temporel ? Comment les phénomènes environnementaux et les objets archéologiques sont-ils datés ?
- comment se sont opérées la formation et l'évolution de l'environnement physique de la zone d'étude dans la longue durée ? Quelle fut la dynamique des paysages fluviaux à l'échelle des territoires et des villes ? Quelles furent les interactions entre les dynamiques des milieux fluviaux, l'occupation et l'exploitation des territoires ?
- combien de temps a duré l'occupation des sites antiques ? Comment les populations humaines se sont-elles approprié les espaces de la zone d'étude dans la longue durée ?
- quelle est l'origine de l'eau consommée dans les lieux habités urbains ou ruraux de la zone d'étude ? Comment fonctionne le système de distribution de l'eau ? Quels sont les structures et ouvrages, en contexte urbain et rural, alimentés en eau ?

Le système d'information géographique vise ainsi à modéliser les variations spatio-temporelles des ressources en eau actuelles et passées, à reconstituer l'évolution des bassins-versants et son impact sur les ressources en eau, à restituer les interactions entre les ressources en eau disponibles et les aménagements antiques et enfin à restituer le fonctionnement des systèmes hydrauliques.

Cette première étape est essentielle, car elle détermine l'opération de structuration de l'information géographique et débouche sur la conception du Modèle Conceptuel de Données (MCD) en lien avec la problématique. Le contenu de ces questionnements, vu au travers d'une approche modélisatrice, aide à identifier d'une part les phénomènes complexes et simples possédant une structure intrinsèque, d'autre part leurs interrelations spatiales. Ainsi, modéliser la gestion de l'eau dans le cadre du programme ANR *EauMaghreb* permet de comprendre le "phénomène *Eau*" aussi bien du point de vue archéologique et historique que géomorphologique et hydrologique (fig. 2). C'est également identifier les phénomènes explicitant la provenance de l'eau et les principes de circulation de celle-ci comme les moyens et les infrastructures mis en œuvre pour l'acheminer, la distribuer, la stocker, l'évacuer aussi bien en milieu urbain qu'en milieu rural. Cette modélisation spatiale est un support utile pour la création et l'implémentation du système d'information géographique en vue de développer l'analyse spatiale et d'établir la cartographie des phénomènes étudiés.



Fig. 2. La source antique d'aïn Schkor, au nord de *Volubilis*, encore utilisée aujourd'hui par les habitants des villages voisins (*EauMaghreb*).

LE MODÈLE CONCEPTUEL DE DONNÉES OU LA RECONNAISSANCE DU SQUELETTE DES DONNÉES

La méthode Hypergraph Based Data Structure (HBDS)

Le Modèle Conceptuel de Données correspond à une opération de reconnaissance de la structure des données¹⁴. En effet, l'approche modélisatrice vise à décomposer les phénomènes spatiaux complexes en phénomènes simples, eux-mêmes composés d'objets géographiques ayant les mêmes caractéristiques – c'est-à-dire les mêmes propriétés au sens mathématique du terme et les mêmes attributs au sens informatique du terme – que les phénomènes spatiaux simples auxquels ils se rattachent. Ce procédé utilise deux approches complémentaires, l'une systémique via une démarche phénoménologique, l'autre systématique via une démarche réductionniste ou classificatoire, pour répondre aux questions posées. La première approche conduit à une conception globale et relationnelle de l'ensemble des phénomènes spatiaux mettant à plat leurs structures. La seconde aboutit à la décomposition de la réalité complexe en phénomènes spatiaux simples selon une organisation hiérarchique (fig. 3).

La méthode de modélisation Hypergraph Based Data Structure (HBDS), conçue par François Bouillé en 1977¹⁵, permet de mettre en œuvre conjointement ces deux approches pour reconnaître le squelette des phénomènes spatiaux constitutifs du système complexe, en l'occurrence *EauMaghreb*. La méthode HBDS est fondée sur les deux théories mathématiques des graphes et des ensembles : l'une formalise l'aspect relationnel et interactif du système, l'autre son aspect compositionnel (fig. 3). L'ensemble permet, d'une part, de procéder du général au particulier – du global au local –, d'autre part, de décomposer les phénomènes spatiaux pour ensuite les reconstruire. Par exemple, à l'intérieur d'un îlot, les bâtiments ont pu évoluer, selon les phases chronologiques, par modification de l'agrégation des pièces¹⁶. Les structures interne et externe des phénomènes sont ainsi formalisées mathématiquement comme celles des objets géographiques, matérialisés sous forme de données spatiales.

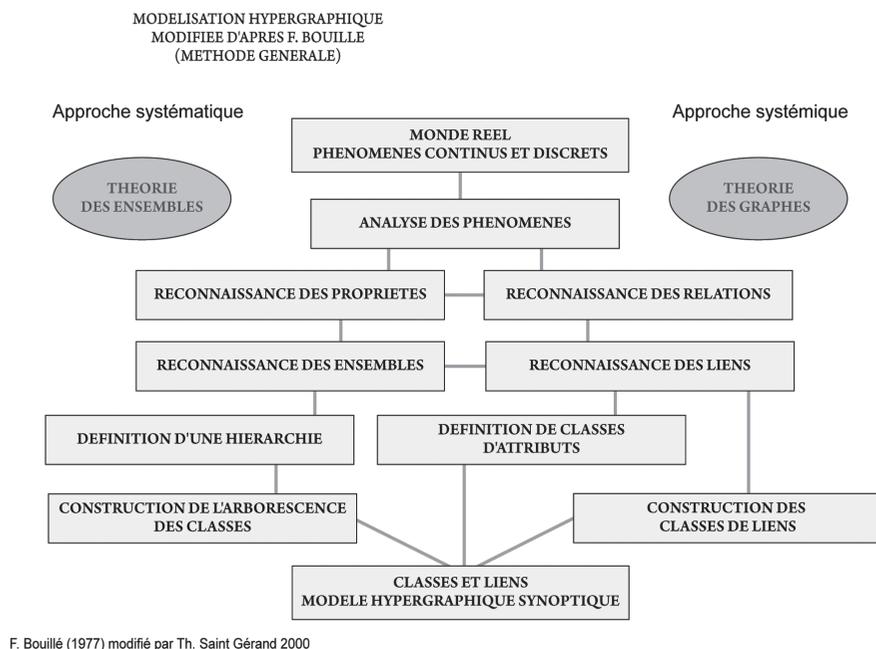


Fig. 3. Principes de la méthode Hypergraph Based Data Structure (HBDS).

14. Arab 2005.

15. Bouillé 1977 ; voir aussi Bouillé 1978a et 1978b.

16. À *Volubilis*, l'évolution de la maison d'Orphée ou des maisons du quartier nord-est peut être modélisée de cette façon.

Par cette méthode, la structuration de l'information spatio-temporelle se formalise en termes d'*hyperclasse* pour les phénomènes complexes, de *classe* pour les phénomènes simples et d'*objet* pour les objets géographiques (ou entités spatiales). Les *liens sémantiques* se rapportent aux relations sémantiques entre les phénomènes complexes et/ou simples ainsi qu'entre les objets géographiques. Les caractéristiques des phénomènes complexes correspondent aux *attributs* (ou propriétés, valuations) des *hyperclasses*, celles des phénomènes simples aux *attributs* des *classes*, celles des objets géographiques aux *attributs* des *objets* et celles des liens sémantiques aux *attributs* des *liens*. La topologie est présente aussi bien à l'intérieur des classes qu'entre les classes, ainsi qu'au sein de la structure interne des objets qu'entre les objets à l'intérieur de chaque classe (fig. 4).

L'approche systématique identifie les classes et leurs composants que sont les objets géographiques, reprenant la terminologie des classes, alors que l'approche systématique traduit l'organisation hiérarchique des structures sous forme de liens sémantiques entre les classes et donc entre les objets géographiques¹⁷ (fig. 4a).

Chaque phénomène complexe est composé de plusieurs hyperclasses (par exemple *Zone bâtie*) constituées elles-mêmes de classes (*Site*, *Quartier*, *Îlot*, *Bâtiment*, *Pièce*, fig. 4b).

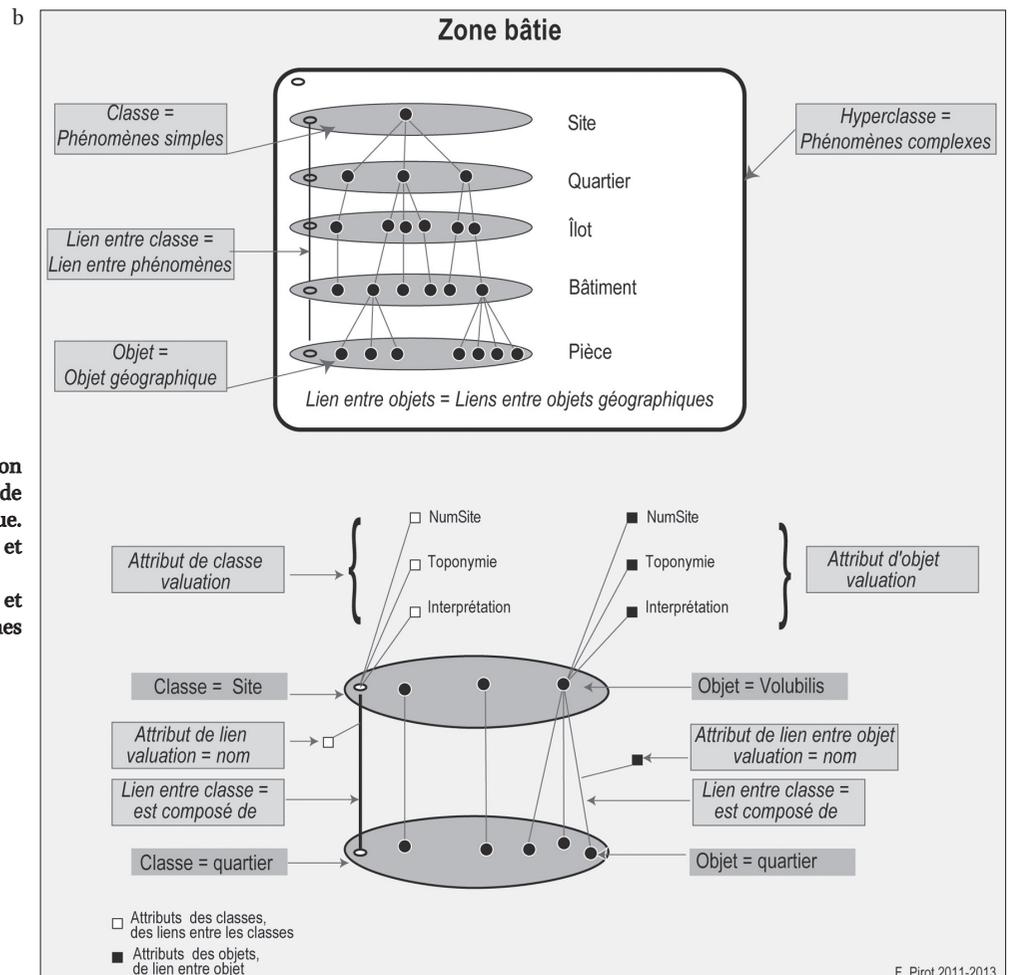
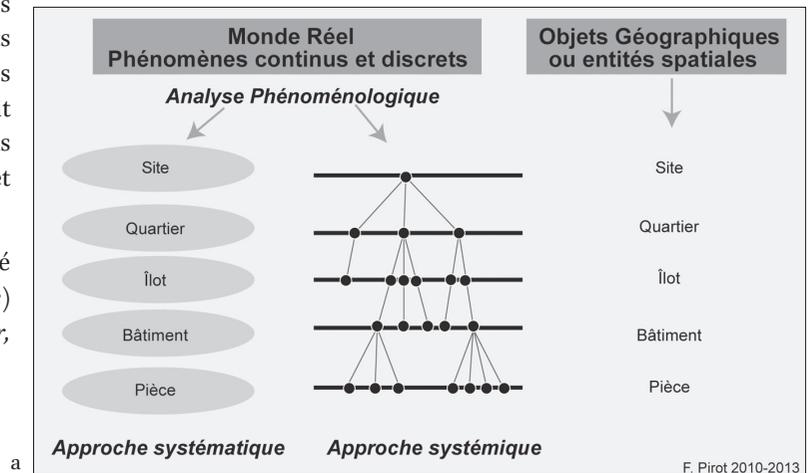


Fig. 4. Méthode HBDS. Modélisation et structuration spatiales de l'information géographique. a. Approches systématique et systémique ; b. Structures internes et externes des phénomènes spatiaux.

17. Pirot 2011.

Chaque classe (par exemple *Site*) est composée d'objets géographiques (les sites, comme *Volubilis*), caractérisés par une série d'attributs (*NumSite*, *Toponymie*, *Interprétation*, etc.).

La méthode HBDS intègre aussi le référentiel spatial et prend en compte les espaces géographique, thématique et temporel. Ainsi, l'entité spatiale devient porteuse simultanément de ces trois valeurs.

Le Modèle Conceptuel de Données (MCD) "Gestion de l'eau au Maghreb"

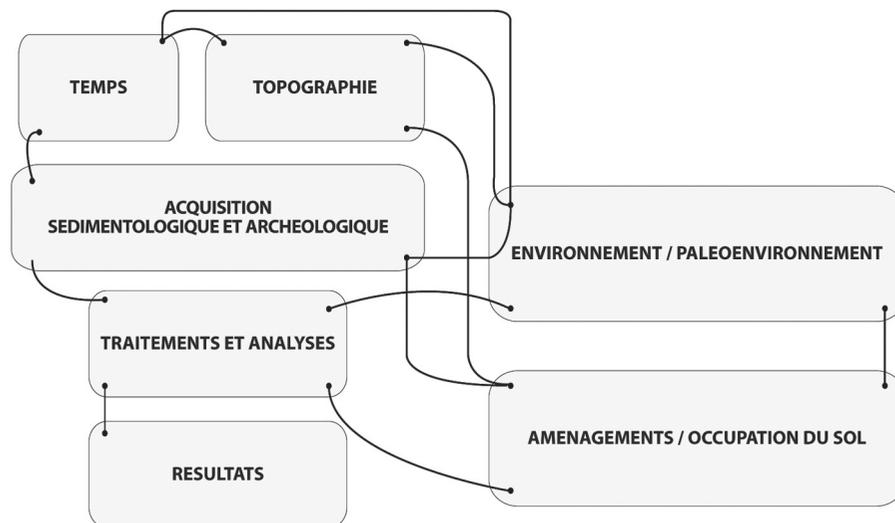
La modélisation spatiale abstraite d'une partie du monde réel, dans le cas présent la gestion de l'eau au Maghreb, a permis d'élaborer, lors d'une deuxième étape, le Modèle Conceptuel de Données en fonction de la problématique du programme. Le MCD synthétise dans un graphique l'ensemble des phénomènes complexes et/ou simples (c'est-à-dire les structures internes des phénomènes spatiaux) sous forme d'hyperclasses et de classes ainsi que l'ensemble des inter-relations spatiales (c'est-à-dire les structures externes entre les phénomènes spatiaux) sous forme de liens sémantiques, le tout composant le système complexe *Gestion de l'eau au Maghreb*.

Il y a sept ensembles de phénomènes spatiaux principaux : *Environnement / Paléoenvironnement*, *Topographie*, *Acquisitions sédimentologiques et archéologiques*, *Aménagement / Occupation du sol*, *Temps*, *Traitements et Analyses*, *Résultats* (fig. 5).

Pour une meilleure lecture du Modèle Conceptuel de Données, nous le présentons décliné en plusieurs figures où sont isolés : les hyperclasses et les classes, qui permettent de visualiser les structures internes de chaque phénomène spatial complexe ou simple (fig. 6), les principaux liens sémantiques concernant l'ensemble des phénomènes (fig. 8), les liens relatifs à la géographie et à l'archéologie (fig. 9) et enfin le graphique complet (fig. 10).

LA STRUCTURE INTERNE

Nous préciserons, à titre d'exemple, le contenu des trois hyperclasses, *Environnement / Paléoenvironnement*, *Aménagement / Occupation du sol* et *Temps*, qui constituent les phénomènes spatiaux complexes clés du système : les deux premiers phénomènes englobent les classes liées aux aspects environnementaux, notamment l'hydrologie, et à l'occupation du sol, en particulier les aménagements hydrauliques, tandis que le troisième leur donne la dimension temporelle (fig. 10). Dans l'hyperclasse *Environnement / Paléoenvironnement*, le niveau de précision accordé aux *Modelés* reflète la place qui leur est



2013. Méthode HBDS, programme ANR "EauMaghreb"

Fig. 5. Squelette de la structure du système complexe *Gestion de l'eau au Maghreb*.

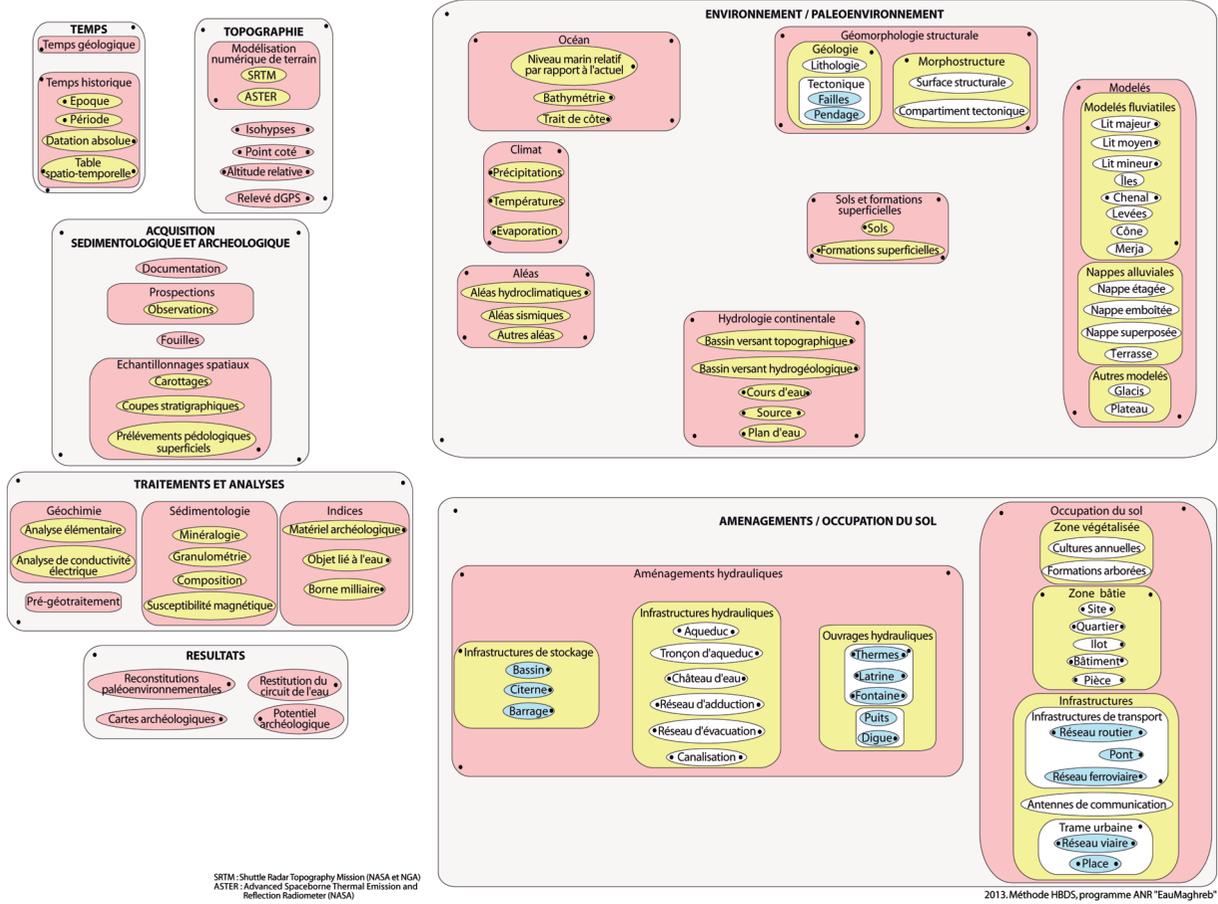


Fig. 6. MCD. Structuration interne des phénomènes spatiaux complexes et/ou simples (*EauMaghreb*).

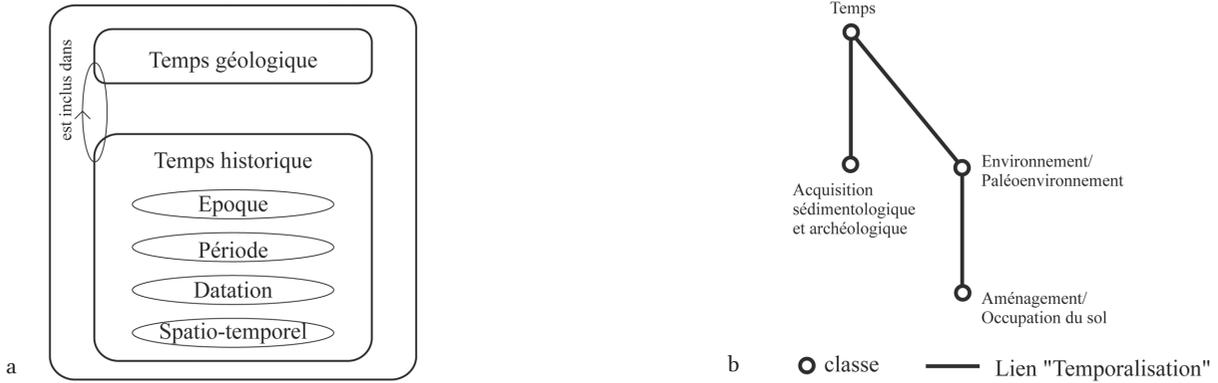


Fig. 7. Phénomène complexe Temps. a. Hyperclasse Temps, structure interne du phénomène Temps ; b. Hypergraphe Temps, structure externe du phénomène Temps.

donnée dans l'analyse. De même, le sur-développement de l'hyperclasse *Aménagements hydrauliques*, constituée de trois autres phénomènes complexes (*Infrastructures de stockage*, *Infrastructures hydrauliques* et *Ouvrages hydrauliques*), montre qu'elle concerne l'une des problématiques majeures du projet. La structure de *Zone bâtie*, déclinée au moins en cinq classes décrivant l'occupation urbaine à des niveaux différents (*Site*, *Quartier*, *Îlot*, *Bâtiment*, *Pièce*), montre l'emboîtement des échelles, ce qui paraissait nécessaire pour aborder la problématique posée. Enfin, le contenu de l'hyperclasse *Occupation du sol*, intégrant des réalités passées (*Site*) et/ou actuelles (*Réseau ferroviaire* ou *Antennes de communication*) correspond à la volonté d'intégrer la dimension diachronique à l'analyse de l'occupation du sol. L'ensemble de ces objets peut être différencié par l'hyperclasse *Temps* qui permet de dater chaque structure ou événement individuellement.

Comme les disciplines de la géographie physique et de l'archéologie déclinent le temps selon des intervalles différents, le phénomène complexe *Temps* distingue les espaces temporels géologique et historique, en les traduisant par deux hyperclasses. Celles-ci sont reliées par un lien sémantique qui montre que le temps historique *est inclus* dans le temps géologique. De plus, l'espace temps doit prendre en compte aussi bien le moment d'apparition ou de création des objets géographiques que leur durée. Il s'ensuit que la discrétisation du temps¹⁸ est faite par rapport à une date ponctuelle (classe *Datation absolue*) et/ou par un intervalle de temps donné (classes *Époque*, *Datation*, *Table spatio-temporelle*).

Le temps de l'environnement et le temps des sociétés sont tous les deux composés de phénomènes discrets et continus qui peuvent être le résultat de processus ayant des échelles de temps différentes, mais pouvant se superposer. Chaque type de temps a sa propre structure interne et externe.

Dans le cas du temps de l'environnement, les phénomènes tectoniques, sismiques, volcaniques et certains phénomènes géomorphologiques¹⁹ peuvent être assimilés à des phénomènes discrets se produisant à une date ponctuelle que l'on précisera. En revanche, certaines évolutions comme une partie du modelé du relief sont les résultats de processus physiques continus et discrets dans la longue durée géologique²⁰.

Dans le cas du temps historique, l'occupation humaine d'un territoire peut être considérée comme un phénomène continu étant apparu à l'intérieur d'un intervalle de temps borné²¹. De même, les événements liés aux guerres peuvent être perçus comme des phénomènes ponctuels apparaissant à une date donnée et ayant une durée limitée au regard du temps historique. Celui-ci est inclus dans le temps géologique, mais avec un lien étroit entre eux au travers de la connaissance de la datation.

Le temps se formalise ainsi par le couple $(t_i, \Delta t_j)$ où t_i ²² est la date ponctuelle et Δt_j est l'intervalle de temps considéré. Par exemple, l'occupation du site de Volubilis débute en l'an 150 a.C. et se termine en 1500 d.C. Le temps est formalisé par le couple $(-150, 1650)$ où $t_i = -150$ et $\Delta t_j = 1650$. L'intervalle de temps peut être défini par les valeurs des bornes inférieure et supérieure incluses ou par la valeur de la durée de l'intervalle de temps. À partir de la valeur de la date ponctuelle et celle de la durée, il est possible de calculer les valeurs des bornes de l'intervalle temps. La date ponctuelle -150 correspond à la date du début de l'occupation du site de Volubilis, tandis que la valeur de l'intervalle 1650 correspond à la durée de l'occupation du site de Volubilis. Dans le MCD, la datation des phénomènes spatiaux est transmise au travers des liens sémantiques *temporalisation* entre les hyperclasses (fig. 7).

18. Hartmut Güting & Schneider 2005.

19. Par exemple, l'avulsion du lit fluvial d'un oued ou le recoupement d'un de ses méandres.

20. Ainsi, l'élévation graduelle de l'altitude d'une plaine alluviale sous l'effet des dépôts de débordement successifs de l'oued ou la migration latérale d'un méandre.

21. On entend par intervalle de temps borné surtout les règnes d'empereurs romains.

22. T_i est une série de dates ponctuelles dont i prend la valeur de 1 à n où n correspond au nombre de dates ponctuelles.

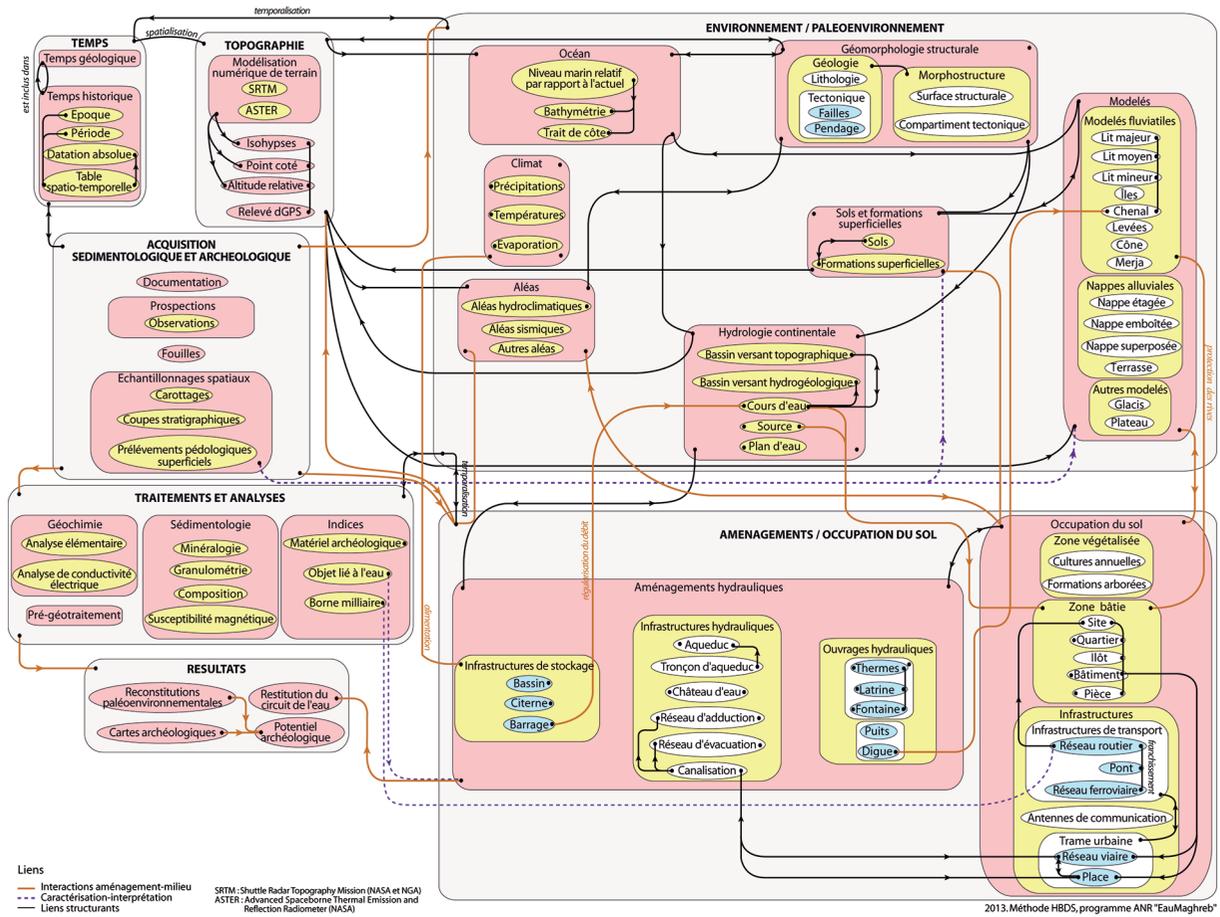


Fig. 8. MCD. Structuration externe des phénomènes spatiaux avec les liens sémantiques relatifs à l'ensemble des hyperclasses.

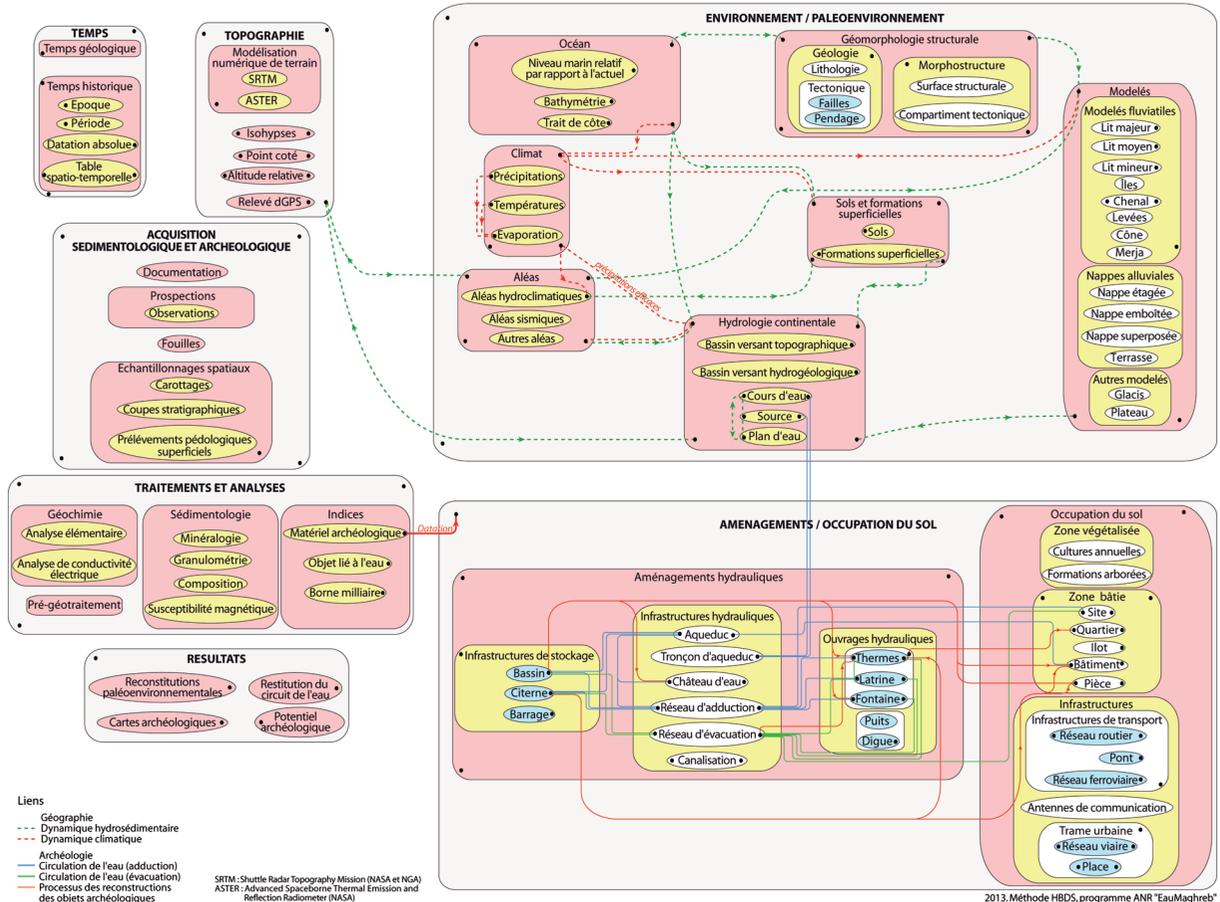


Fig. 9. MCD. Structuration externe et liens sémantiques spécifiques à la géographie et à l'archéologie.

LA STRUCTURE EXTERNE

De la même façon, ont été recherchées les structures externes de chaque phénomène spatial, matérialisées sous forme de liens sémantiques entre les phénomènes complexes et entre les phénomènes simples (cf. fig. 8 et 9). On peut regrouper les liens propres aux phénomènes géographiques ou archéologiques dans des hyperliens²³ sémantiques (*Géographie* et *Archéologie*).

En partant du constat simple qu'à l'époque romaine comme actuellement, les aqueducs étaient alimentés en eau par des sources, qui sont des phénomènes naturels appartenant à l'environnement passé et/ou actuel : la classe *Tronçons d'aqueducs*, composant des *Aménagements hydrauliques*, est reliée aux phénomènes simples *Source* et *Cours d'eau*, deux des éléments de l'hyperclasse *Hydrologie continentale*, par des liens sémantiques *Circulation de l'eau* (*adduction*). La communication entre *Aménagements / Occupation du sol* et *Environnement / Paléoenvironnement* est également présente au travers des liens sémantiques *Interactions aménagement-milieu* qui associent notamment les cours d'eau avec les barrages et avec les zones bâties (fig. 10).

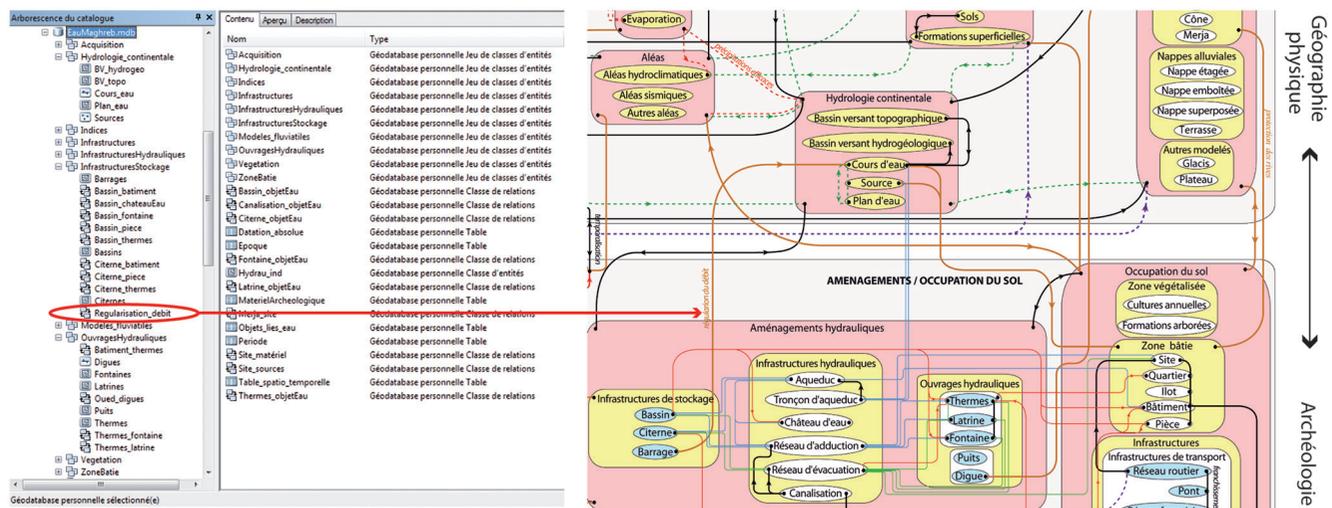


Fig. 10. Matérialisation de la communication entre les hyperclasses *Aménagement / Occupation du sol* et *Environnement / Paléoenvironnement*.

Ces dernières relations ont également une valeur topologique évidente qui se retrouve dans les liens structurants, par exemple entre *Bâtiment* et *Place* dans l'hyperclasse *Occupation du sol* ou entre *Canalisation* (hyperclasse *Infrastructure hydraulique*) et *Réseau viaire*. L'hyperlien structurant reliant *Aménagements hydrauliques* à *Occupation du sol* contient également une dimension topologique et rassemble cette signification pour toutes les structures hydrauliques par rapport aux éléments de *Zone bâtie*.

En revanche, le lien *Processus des reconstructions des objets archéologiques*, s'il contient une valeur topologique, montre surtout la constitution des objets : par exemple, les bassins peuvent être un élément des châteaux d'eau, des fontaines, des thermes et des maisons. Les citernes peuvent dépendre de bâtiments, de thermes, de maisons, de sanctuaires et, en fonction du degré de précision atteint dans la connaissance archéologique, de pièces ou d'espaces caractéristiques.

23. Hyperlien : ensemble de liens sémantiques ayant une signification similaire.

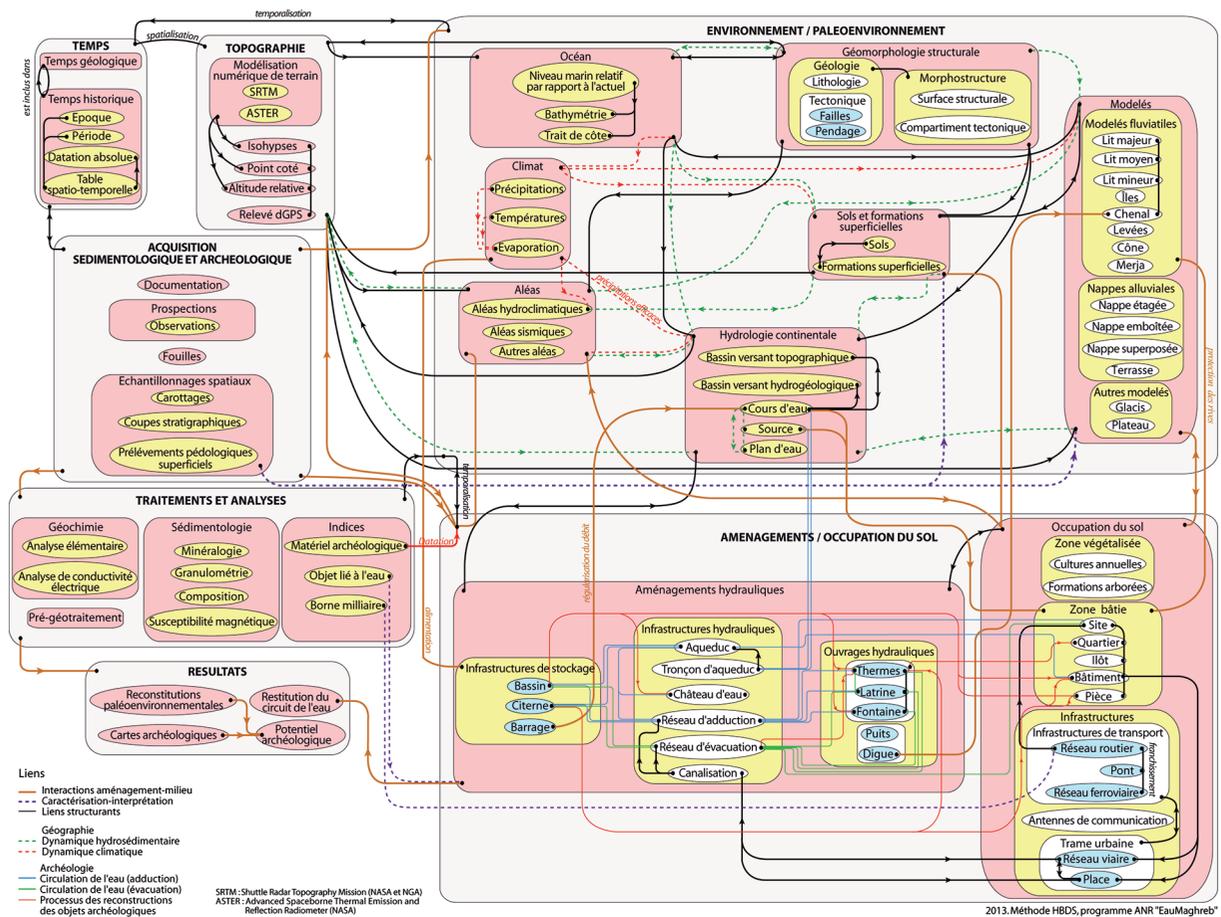


Fig. 11. Modélisation spatiale des phénomènes thématiques spatio-temporels structurant le système complexe EauMaghreb selon la méthode HBDS.

Un ensemble de liens spécifiques reliant les classes des aménagements hydrauliques entre elles, avec *Zone bâtie* et avec les sources et les cours d'eau, explicite la circulation de l'eau, c'est-à-dire le réseau d'adduction, depuis le captage, les ouvrages de distribution et de stockage vers les structures desservies en eau, puis le réseau d'évacuation.

Ainsi, le Modèle Conceptuel de Données prend en compte aussi bien les aspects archéologiques et historiques que géomorphologiques et hydrologiques en les liant de façon sémantique et topologique. L'identification conjointe des structures internes et externes donne lieu au Modèle Conceptuel de Données complet intégrant les phénomènes spatiaux en termes d'hyperclasses et de classes ainsi que les liens sémantiques en termes de liens (fig. 11).

LES CARACTÉRISTIQUES ET LA NATURE DES OBJETS GÉOGRAPHIQUES

En parallèle sont développées les caractéristiques des classes, appelées propriétés ou attributs, toujours dans le cadre d'une étroite collaboration entre thématiciens. Des champs relatifs à l'identification des objets géographiques sont déclinés, de façon à intégrer des valeurs codifiées pour certains (par exemple pour la classe *Tronçons d'aqueducs* : *num site*, *n° tronc. aq.*, *n° aqueduc*, *nom*, *n° source*, *n° rue*, *n° place*), avec un champ unique permettant un traitement systématique (pour l'exemple présenté : *n° tronc. aq.*). Dans le cas du projet *EauMaghreb*, une série de champs descriptifs est associée aux objets archéologiques (fig. 14), certains à valeur numérique (*largeur du specus*, *longueur du tronçon*), parfois destinés à accueillir le résultat d'un calcul (*nombre de tronçons*, *longueur maximum de l'aqueduc*), d'autres à valeur textuelle (*description*,

mode d'acquisition, auteur acquisition, conservation, tracé) ou de type binaire²⁴ (*chambre de captage, regards*) permettent de caractériser l'objet géographique, en l'occurrence la structure archéologique.

En dernier lieu sont identifiés les objets géographiques qui composent les phénomènes spatiaux simples au niveau le plus fin comme la pièce (cf. fig. 4a, 6) ainsi que la nature de leurs implantations spatiales, qui peut être ponctuelle, linéaire, surfacique, en réseau ou encore une combinaison de celles-ci. On notera qu'un même phénomène spatial peut avoir plusieurs types d'implantation, en fonction du changement d'échelle. Ce choix se fait en accord entre les thématiciens et selon l'échelle d'analyse.

À ce stade, la vision globale des données, des objectifs du SIG et de la nature des analyses spatiales prévues doit être claire. L'aboutissement du MCD est ainsi le résultat d'un long travail de réflexion et de discussion entre spécialistes.

MODÈLE LOGIQUE /MODÈLE PHYSIQUE DES DONNÉES : IMPLÉMENTATION DE LA GÉODATABASE "EAUMAGHREB"

Dans la mesure où la méthode HBDS est mise en œuvre dans la conception et la création du MCD, il n'est pas alors nécessaire de créer un modèle logique de données parce qu'il y a adéquation, en termes de concepts et de terminologie, entre cette méthode et celle implémentée dans le logiciel ArcGIS-ArcEditor-ArcInfo²⁵ choisi pour la construction physique de la géodatabase topologique vide²⁶. Celle-ci est d'une part le résultat du processus de modélisation sous forme d'une image physique, concrète du Modèle Conceptuel de Données, d'autre part le reflet de la problématique du programme ANR *EauMaghreb*. La géodatabase est l'aspect visible du système d'information géographique explicitant la gestion de l'eau antique au Maghreb (fig. 12). À cette étape, seul est créé le squelette de la géodatabase topologique²⁷.

À chaque phénomène complexe correspond une hyperclasse, à chaque phénomène simple correspond une classe, mais la géodatabase ne prévoit qu'un seul niveau d'hyperclasse. Au moment de l'implémentation, il s'agit donc de sélectionner, pour chaque phénomène spatial complexe, les hyperclasses qui seront transcrites.

L'interface d'ArcGis permet la création d'hyperclasses, de classes et de relations entre les classes pour traduire les liens sémantiques (fig. 12). Par exemple, les liens dits *structurants* renvoient à une relation d'appartenance entre deux objets géographiques de classes ou d'hyperclasses distincts et se traduisent facilement en relations de type *appartient à*, comme pour les objets géographiques de l'hyperclasse *Aménagements hydrauliques* vers *Zone bâtie*. Il faut noter cependant que certaines relations, significatives lors de la structuration logique des données et apparaissant dans le MCD, ne sont pas nécessairement retranscrites dans la géodatabase ou peuvent prendre d'autres formes que les classes de relations. Ces liens doivent être discriminés au moment de l'implémentation, à l'exemple de ceux nommés *Interactions aménagement-milieu* qui sont des liens d'analyse intégrant des résultats (mise en évidence de zones d'occupation potentielles, restitution du circuit de l'eau), mais ne sont pas matérialisés sous forme de relations dans la géodatabase. D'autres liens, comme celui de la *Circulation de l'eau*, traduisent un fonctionnement en réseau : il est apparu intéressant d'appliquer le système des "Réseaux géométriques" (*route system*), destinés à modéliser les réseaux de distribution, comme le circuit de l'eau dans l'Antiquité. Celui-ci implique la signification "tel objet alimente tel objet" ainsi qu'un sens de l'écoulement de l'eau dans les structures hydrauliques, depuis la ressource alimentant les aqueducs jusqu'à l'extrémité du réseau d'évacuation (matérialisé par les canalisations et les égouts collecteurs). Chaque structure alimentée en eau (château d'eau, fontaine, thermes, ...) constitue une "jonction" sur le réseau géométrique par laquelle on indique le sens de circulation de l'eau (les "sources" poussent le flux ; les "cuvettes" attirent le flux)²⁸. Il s'agit dans ce cas précis d'une tentative de modéliser le circuit de l'eau théorique basé sur une vision restituée du réseau hydraulique, les tronçons des réseaux d'adduction et d'évacuation n'étant pas connus dans leur intégralité.

24. Le type binaire correspond à la notion de présence/absence formulée par oui/non ou 0/1.

25. Arctur & Zeiler 2004.

26. Baud *et al.* 2011.

27. Arctur & Zeiler 2004.

28. Les termes "jonctions", "sources" et "cuvettes" sont utilisés par ArcGis-ArcInfo pour désigner des entités ponctuelles supportant des fonctions spécifiques (connexion des différents tronçons et indication du sens de circulation) dans les réseaux géométriques (ou "*route system*").

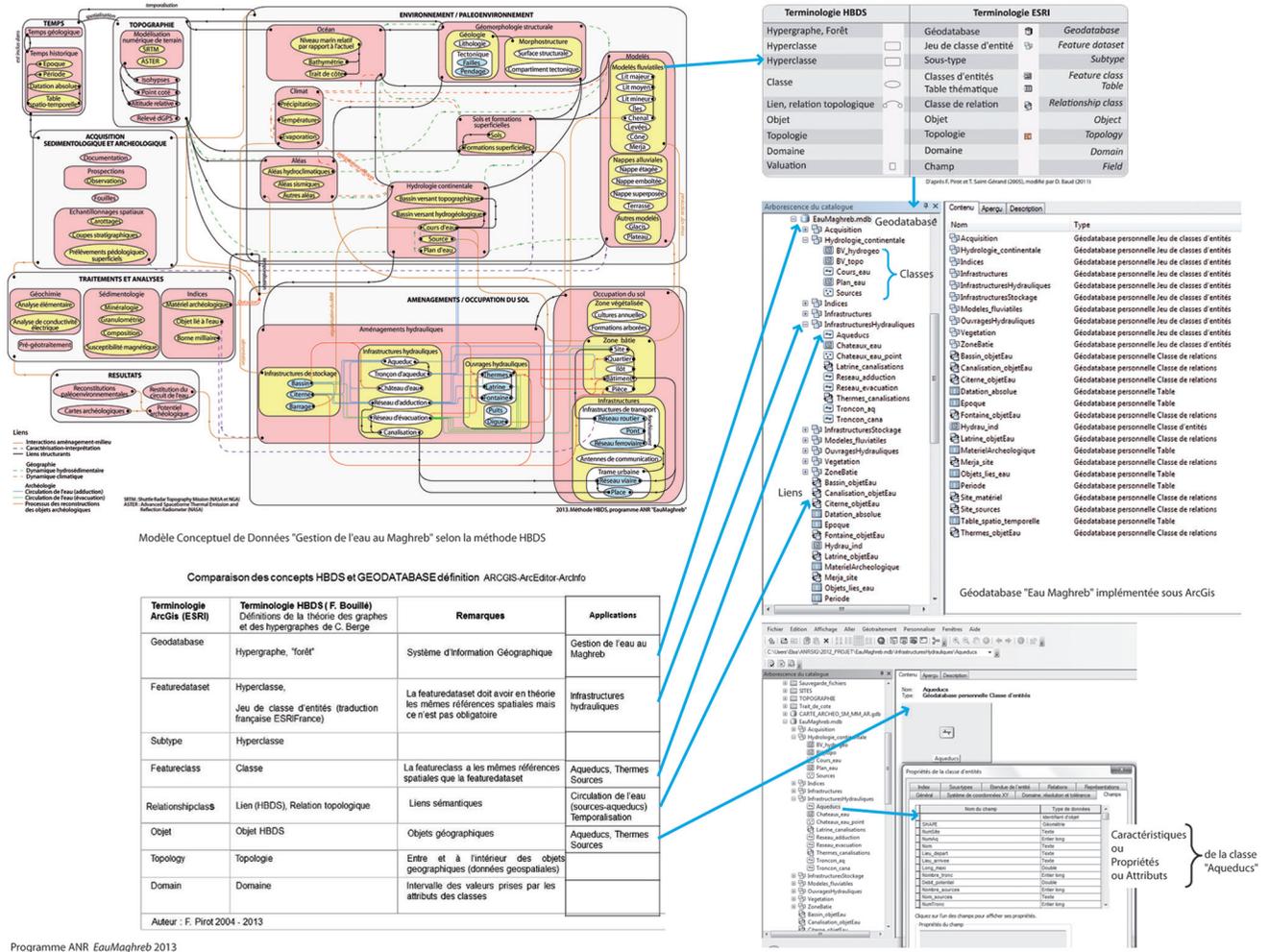


Fig. 12. Système d'Information Géographique *Gestion de l'eau au Maghreb*.

CRÉATION DES DONNÉES GÉOSPATIALES

Pour pouvoir prendre corps, les phénomènes spatiaux simples, composés d'objets géographiques définis lors des processus de modélisation spatiale, sont matérialisés sous forme numérique par des données géospatiales, thématiques et temporelles (fig. 3 et 4). La création physique de leur structure s'organise en fonction du Modèle Conceptuel de Données et de la géodatabase et non en fonction des données existantes (fig. 12). En effet, à tout phénomène spatial complexe correspond une hyperclasse du MCD et un jeu de classes d'entités (*feature dataset*) de la géodatabase et à tout phénomène spatial simple correspond une classe du MCD et une classe d'entités (*feature class*) de la géodatabase (fig. 10 et 12). Les propriétés de la classe, appelées attributs de classe, sont les mêmes que celles des tables "attributaires" qui matérialisent physiquement la thématique du phénomène spatial. Les données géospatiales sont dotées, de ce fait, des mêmes attributs que ceux de la classe et deviennent ainsi porteurs du spatial, du thématique et du temporel, tout en intégrant le référentiel spatial attaché à la dite classe et hérité de l'hyperclasse (fig. 13).

Ceux-ci peuvent être créés et modifiés dans ArcInfo et ArcEditor, mais ils sont en mode lecture seule dans ArcView.

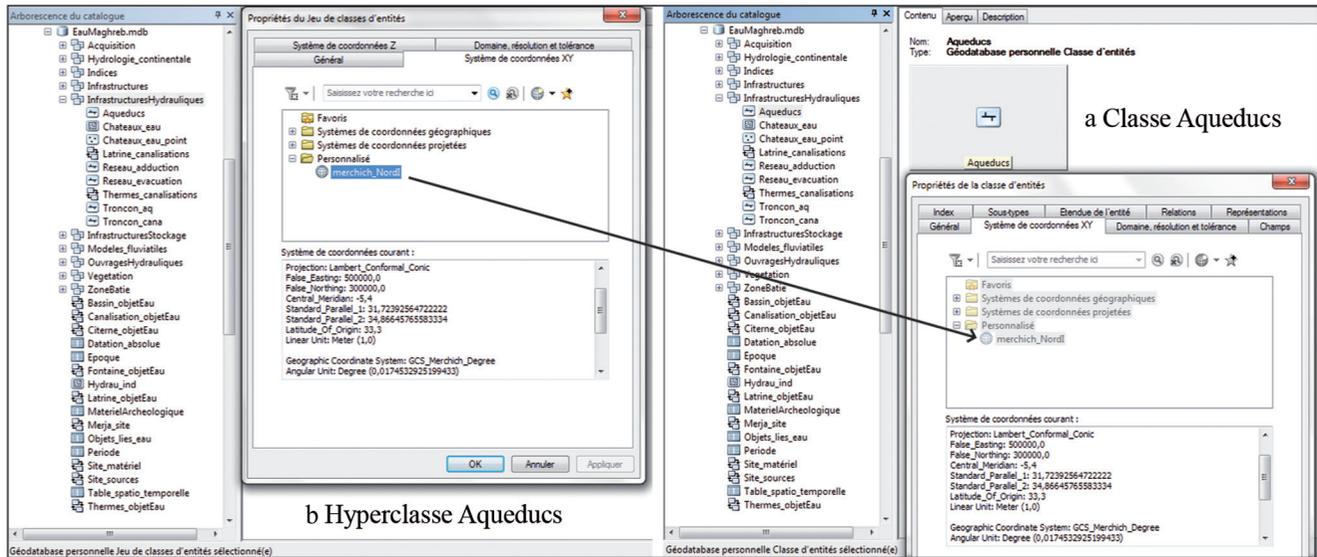


Fig. 13. La classe *Aquaducs* (b) hérite du référentiel spatial de l'hyperclasse *Infrastructures Hydrauliques* (a) (*EauMaghreb*).

Une fois le référentiel spatial intégré²⁹, véritable ciment de la géodatabase, on procède à l'enregistrement des attributs des données géospaciales, hérités des attributs de la classe (fig. 14). Ces données, créées dans un format d'échange conforme aux normes géographiques comme le *shapefile* (*.shp)³⁰ ou selon une structure de données comme la classe d'entités³¹, sont intégrées dans les classes appropriées de la géodatabase topologique. Dans le cas du projet *EauMaghreb*, la majeure partie des données a été digitalisée et les tables attributaires saisies sous ArcGIS, une autre partie a été préparée en amont, sous la forme de tables simples au format "Excel", puis exportées vers la géodatabase une fois finalisée ; enfin la topographie est partiellement issue des données Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)³².

L'analyse spatiale peut être mise en œuvre à l'aide de géo-traitements dont les résultats sont à la fois le point d'arrivée et le point de départ lorsqu'ils deviennent eux-mêmes les données utilisées pour une autre analyse. Ces résultats acquièrent alors la qualité de données dérivées pouvant être intégrées dans les classes de la géodatabase : par exemple, le débit de l'eau dans les tronçons d'aqueduc ou, plus classiquement, le calcul des pentes et de l'ensoleillement à partir des données SRTM. Afin de réaliser les géotraitements, les structures des données géospaciales doivent être topologiques ; quand la topologie n'existe pas, elle est calculée "à la volée".

Une première série d'analyses spatiales géomorphologiques a été réalisée dans le bassin-versant de l'oued Sebou³³ à partir des données des hyperclasses *Géomorphologie structurale*, *Topographie*, des paléochenaux et des dépôts de levées alluviales dans l'hyperclasse *Modélés*, afin de cartographier les éléments de l'évolution paléoenvironnementale de la plaine du Gharb. D'autres géo-traitements sont prévus, par des requêtes et analyses croisées, pour livrer des cartes chrono-thématiques de l'occupation du sol, cartographier l'emplacement des sites par rapport au paléo-réseau hydrographique, ou encore, à une autre échelle, pour restituer le réseau hydraulique à partir des indices liés à l'eau répertoriés dans la ville.

29. Le référentiel spatial utilisé dans le projet est le Merchich Nord Degree utilisant la projection Lambert Conformal Conic et le datum D_Merchich.

30. Shapefile ou fichier de formes : répertoire contenant plusieurs fichiers dans lesquels sont stockées différentes données parmi lesquelles se trouvent les thématiques (*.dbf) et les spatiales (*.shp).

31. Classe d'entité : dans ArcGIS, les classes d'entités sont des ensembles homogènes d'entités avec une représentation spatiale commune et un ensemble d'attributs stockés dans une table de base de données, par exemple, une classe d'entités ponctuelles pour la représentation des sources.

32. NASA et NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) : <http://srtm.usgs.gov/index.php>.

33. Castanet *et al.*, voir dans ce volume, infra 121-151.

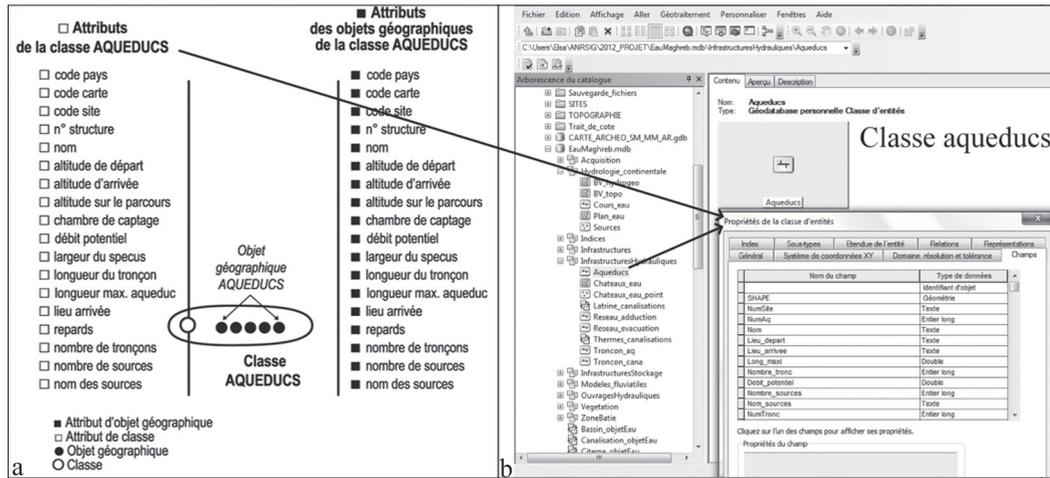


Fig. 14. Propriétés ou attributs de la classe *Aqeducs* et des objets géographiques de la classe *Aqeducs*. a. Méthode HBDS ; b. Sous ArcGis-ArcInfo (*EauMaghreb*).

Qu'apporte l'approche modélisatrice à la conception et à l'utilisation des SIG ? Sur le plan de la recherche, elle permet de structurer en amont la réflexion et favorise le dialogue entre les thématiques, l'élaboration du MCD et la mise en œuvre du SIG, celle-ci étant le fruit d'une véritable collaboration entre les archéologues et les géographes. La réalisation au préalable d'un MCD a permis de mobiliser l'ensemble de l'équipe et de réfléchir de façon concrète et approfondie aux objectifs, aux besoins en termes de données, à l'organisation et à la construction des informations, à la normalisation des données sur le terrain, lors de l'acquisition, du traitement et de la saisie. Cette démarche est aussi d'un apport essentiel sur le plan technique et une étape indispensable pour la création d'une géodatabase. Même si l'ensemble du MCD n'est pas strictement retranscrit dans celle-ci, l'approche modélisatrice consolide la réflexion en amont et clarifie la problématique, les attentes, les objectifs visés que l'on peut atteindre. Cette présentation est destinée à montrer que tout travail de modélisation, et plus particulièrement celui de modélisation spatiale abstraite, s'appuie sur une réflexion conceptuelle indépendante des techniques et des logiciels qui pourraient être utilisés. Cette réflexion participe à l'effort de structuration des phénomènes spatiaux spécifiques à la problématique, ici la gestion de l'eau au Maghreb dans l'Antiquité. Il en est de même pour la création des données géospatiales qui exige un travail fondé sur une réflexion conceptuelle quant à la nature et à l'implantation spatiales des objets géographiques et doit tenir compte du Modèle Conceptuel de Données et de la géodatabase topologique vide. La création et la structuration des données spatiales doivent être menées de façon à conduire correctement l'analyse spatiale (comme les calculs de distance, l'estimation du débit de l'eau ou la restitution du réseau d'adduction). Ainsi, l'intégration de données géospatiales existantes soulève le problème de leur hétérogénéité en termes de précision, de dates de mise à jour, de couverture et de référentiel spatiaux, c'est-à-dire un ensemble de renseignements constituant les métadonnées. Négliger ces considérations pourrait avoir des conséquences sur le déroulement et le résultat des géotraitements.

Les différentes analyses spatiales avancées, réalisées en lien avec le Modèle Conceptuel de Données et à l'échelle des deux fenêtres d'étude de la plaine du Gharb et du territoire de *Volubilis*, et l'intégration des autres zones de recherches permettront de faire évoluer la structure du système d'information géographique et de l'enrichir par l'adjonction de nouvelles données acquises soit sur le terrain soit par calcul.

Références bibliographiques

- Akerraz, A., V. Brouquier-Reddé et É. Lenoir (1995) : “Nouvelles découvertes dans le bassin du Sebou : 1. L’occupation antique de la plaine du Gharb”, in : Troussel, P., *L’Afrique du Nord antique et médiévale : monuments funéraires, institutions autochtones, Histoire et archéologie de l’Afrique du Nord 6, Actes du Colloque international, 18^e Congrès National des Sociétés Savantes (CTHS), Pau, octobre 1993*, Paris, 233-297.
- Akerraz, A., H. Limane, R. Rebuffat, éd., V. Brouquier-Reddé, M. Coltelloni, F.-Z. El Harrif, A. Ichkhakh, M. Kbiri Alaoui, É. Lenoir, M. Lenoir, J. Napoli, A. Oumlil, A. Poignant et A. Portelli (2012) : *Carte archéologique du Maroc antique, Le bassin du Sebou, 2, À l’embouchure du Sebou, Cartes Kénitra-Sidi Yahia du Gharb*, Rabat, VESAM II.2.
- Arab, R. (2005) : *De la conception à la création d’un SIG pour la mise en œuvre d’une méthodologie de recensement des mares. Cas de la Région Nord-Pas de Calais*, Master of sciences, Management des Systèmes d’Information et Applications Géographiques. Rapport de stage de Fin d’Études, École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG) de l’IGN – Marne-la-Vallée.
- Arctur, D. et M. Zeiler (2004) : *Designing Geodatabase: Case Studies in GIS Data Modeling*, Redlands, CA : Esri Press.
- Baud, D., N. Martin et F. Pirot (2011) : “L’atlas des sites archéologiques majeurs de l’Adriatique antique (XI^e s. av. J.-C. - VIII^e s. ap. J.-C.) : utilisation de la modélisation HBDS pour la création de la géodatabase sous ArcGIS”, in : *Actes du colloque SIG2011, La conférence francophone ESRI-Versailles (France), Palais des Congrès, 5-6 octobre 2011*, Cdrom (<http://sig2011.esrifrance.fr/lab-ausonius-crm-m2ia.aspx>).
- Bouillé, F. (1977) : *Un modèle universel de banque de données simultanément partageable, portable et répartie*, thèse d’État Es Sciences, université Pierre-et-Marie Curie-Paris VI.
- (1978a) : “Structuring cartographic data and spatial processes with the hypergraph-based data structure”, in : Dutton, éd. 1978, vol. 1, 1222-1227.
- (1978b) : “Hypergraphes et structures de données cartographiques ; le système HBDS”, in : *9th International Conference of the ICA, College Park, University of Maryland, USA, 26 July-2 August 1978*, College Park, 19-33.
- Chorley, R. J. et P. Haggett, éd. (1967) : *Models in geography*, Londres, Methuen.
- Desruelles, S., C. Castanet, É. Lenoir, A. Akerraz, M. Alilou, R. Arharbi, V. Brouquier-Reddé et J.-B. Houal (2012) : “Approches géoarchéologiques des dynamiques hydrologiques et de leur gestion antique : les cas de Volubilis et de Banasa (Bassin du Sebou, Maroc)”, in : Joly 2012, 63-81 (<http://cths.fr/ed/edition.php?id=6051>).
- Dutton, G., éd. (1978) : *Harvard Papers on Geographic Information Systems: First International Symposium on Topological Data Structures for GIS*, Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis, Cambridge, vol. 1.
- Hartmut Güting, R. et M. Schneider (2005) : *Moving Objects Databases*, San Francisco, Morgan Kaufmann Publisher (<http://dna.femuni-hagen.de/Lehre-offen/Kurse/1675/KE1.pdf>).
- Joly G. (2012) : *Les paysages de l’eau (édition électronique), 135^e Congrès national des sociétés historiques et scientifiques, Neuchâtel, 5-8 avril 2010, Actes des congrès nationaux des sociétés historiques et scientifiques*.
- Labarthe, H. et F. Pirot (2008) : “De la modélisation HBDS à l’implémentation sur ArcCatalog-ArcInfo© : un simple prolongement. À propos de la géodatabase obediences”, in : *Actes du colloque SIG2008, La conférence francophone ESRI-Versailles (France), Palais des Congrès, 12 octobre 2008*, Cdrom.
- Lavaud, S. et B. Schmidt, éd. (2012) : *Représenter la Ville (Moyen Age-XXI^e siècle)*, Ausonius Scripta Mediaevalia 20, Bordeaux.
- Lenoir, M. (1993) : “*Ad Mercuri templum*. Voies et occupation antiques du nord du Maroc”, *Mitteilungen des deutschen archäologischen Instituts. Römische Abteilung*, 100, 507-520.
- Molenaar, M. (1998) : *An introduction to the theory of spatial object modeling for GIS*, Research Monographs in GIS series 4, Londres.
- Pirot, F. (2011) : “Méthodologies pour la Modélisation de l’information spatiale”, in : *Actes du Colloque International-Euro Méditerranéen, Systèmes d’Information géographique (SIG) et Télédétection : des outils d’aide à la décision des territoires dans les pays du bassin méditerranéen, université Moulay Ismail, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Meknès (Maroc), 8-9 & 10 novembre 2006*, Séries, Actes de colloque, 30/2011, Meknès, 15-28.
- (2012) : “De la modélisation de l’Information Géographique à la création des données géo-spatiales”, in : Lavaud & Schmidt, éd. 2012, 309-342.
- Pirot, F. et T. Saint Gérard (2005) : “La géodatabase sous ArcGis : des fondements conceptuels à l’implémentation logicielle”, *Géomatique Expert*, 41/42, 62-66.
- Pirot, F., T. Saint Gérard, E. Gauthier et A. Banza-Nsungu (2006) : “L’analyse spatiale contre algèbre de cartes. Des exemples en sciences de l’homme et de la société”, *Géomatique Expert*, 48, 51-63.
- Ragala, R., S. Desruelles, J.-P. Amat, F. Baratte, V. Brouquier-Reddé, É. Lenoir, D. Grammond, E. Rocca, V. Bernollin et M. Gherghout (sous presse) : “De la problématique au modèle

- conceptuel de données : approche géoarchéologique sous SIG", in : *Ressources en eau des cités et de leurs territoires en Maurétanie tingitane, Rabat, 27-28 février 2009*, Rabat (sous presse).
- Raper, J. (2000), *Multidimensional geographic information science*, Londres-New York.
- Rebuffat, R. (2011) : "La carte archéologique du Maroc", *Les Nouvelles de l'archéologie*, 124, 16-20 (<https://nda.revues.org/1414>).
- Rebuffat, R., H. Limane, éd., A. Akerraz, H. Limane, R. Rebuffat, dir., N. Bayle, V. Brouquier-Reddé, A. Chergui, M. Coltelloni-Trannoy, S. Crogiez-Pétrequin, F. Z. El Harrif, I. Gabard, M. Habibi, K. Holland Heller, L. Laamiri, É. Lenoir, M. Lenoir, J. Napoli, A. Poignant et A. Portelli (2011) : *Carte archéologique du Maroc antique, Le bassin du Sebou, 1, Au sud du Loukkos, Cartes Arbaoua-Lalla Mimouna-Moulay Bou Selham*, Rabat, VESAM II.1.

* Françoise Pirot, Centre d'Études de l'Inde et de l'Asie du Sud, UMR 8564, CNRS
Véronique Brouquier-Reddé, AOrOc, UMR 8546, CNRS - ENS - Université Paris Sciences & Lettres
Elsa Rocca, Orient et Méditerranée, UMR 8167, Université Paris-Sorbonne
Cyril Castanet, Laboratoire de Géographie Physique, Environnements Quaternaires et Actuels, UMR 8591, Université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis - CNRS
Stéphane Desruelles, ENEC, UMR 8185, Université Paris-Sorbonne - CNRS
Éliane Lenoir, AOrOc, UMR 8546, CNRS - ENS - Université Paris Sciences & Lettres
Rachid Ragala, ENEC, UMR 8185, Université Paris-Sorbonne - CNRS

