HAL
open science

Analyse des dynamiques spatio-temporelles des systèmes de peuplement dans un contexte d'incertitude. Application à l'archéologie spatiale.

Johanna Fusco

▶ **To cite this version:**

Johanna Fusco. Analyse des dynamiques spatio-temporelles des systèmes de peuplement dans un contexte d'incertitude. Application à l'archéologie spatiale.. Géographie. UMR 7300 ESPACE (Université Nice Sophia-Antipolis); UMR 7264 CEPAM (Université Nice Sophia-Antipolis), 2016. Français. NNT : . tel-01317630

HAL Id: tel-01317630

https://hal.science/tel-01317630v1

Submitted on 18 May 2016

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.

UNIVERSITÉ NICE SOPHIA ANTIPOLIS

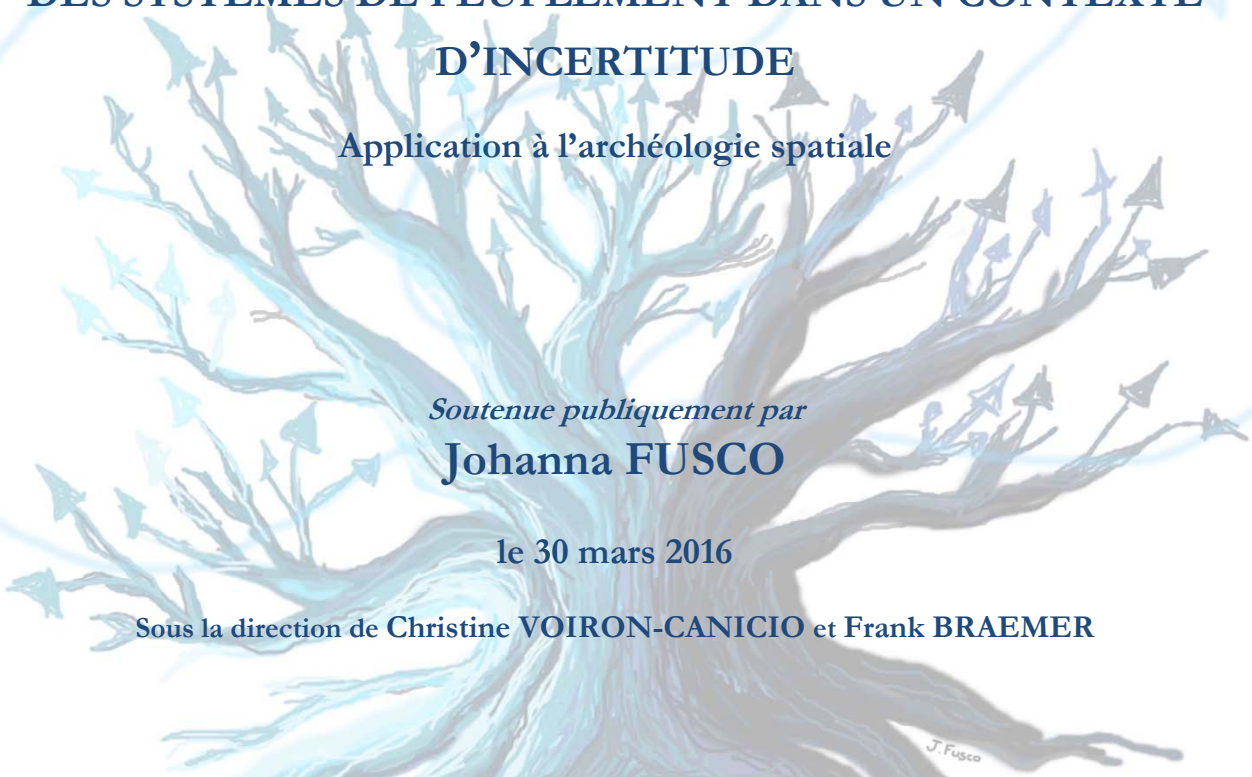
UFR « Sciences »
École Doctorale « Lettres, Sciences Humaines et Sociales »

Laboratoire ESPACE – UMR 7300
Laboratoire CEPAM – UMR 7264

THÈSE
pour l'obtention du titre de
DOCTEUR DE l'UNIVERSITÉ NICE SOPHIA ANTIPOLIS
Discipline : Géographie

ANALYSE DES DYNAMIQUES SPATIO-TEMPORELLES DES SYSTEMES DE PEUPLEMENT DANS UN CONTEXTE D'INCERTITUDE

Application à l'archéologie spatiale



Soutenue publiquement par
Johanna FUSCO

le 30 mars 2016

Sous la direction de Christine VOIRON-CANICIO et Frank BRAEMER

Composition du jury :

M. Arnaud BANOS, Directeur de recherche CNRS, Géographie-Cités	**Rapporteur**
M. Frank BRAEMER, Directeur de recherche CNRS, CEPAM	**Co-directeur**
M. Bernard GEYER, Directeur de Recherche CNRS, ArchéOrient	**Rapporteur**
M. Graham PHILIP, Professeur, Durham University	**Examinateur**
Mme Lena SANDERS, Directrice de recherche CNRS, Géographie-Cités	**Examinatrice**
Mme Christine VOIRON-CANICIO, Professeure, Université de Nice-Sophia Antipolis	**Directrice**

Pour pouvoir arriver à ce que tu ne connais pas

Tu dois emprunter la voie de l'ignorance.

Pour pouvoir posséder ce que tu ne possèdes pas

Tu dois emprunter la voie de la dépossession.

Pour pouvoir arriver à ce que tu n'es pas

Tu dois emprunter la voie dans laquelle tu n'es pas.

Et ce que tu ne connais pas est la seule chose que tu connaisses

Et ce que tu possèdes est ce que tu ne possèdes pas.

Et là où tu es est là où tu n'es pas.

T. S. Eliot,

Quatre Quatuors (1968)

Remerciements

Je souhaite tout d'abord adresser mes plus vifs remerciements à ma directrice de thèse, Madame Christine Voiron-Canicio, qui m'a suivie tout au long de mon parcours à l'Université et m'a transmis le goût de la recherche. Merci pour votre confiance, pour votre gentillesse, pour tout le temps que vous m'avez consacré et les moments partagés au laboratoire ou en colloque.

Mes plus sincères remerciements vont également à M. Frank Braemer, mon co-directeur : merci pour l'intérêt que vous avez porté à ma recherche depuis notre rencontre, pour votre confiance et pour votre patience à mon égard dans mon immersion au sein de l'univers archéologique.

Les moments passés avec mes directrice et directeur de recherche ont pour moi été bien plus que de simples rendez-vous professionnels, et c'est toujours avec un grand plaisir que je les ai vécus. Qu'ils soient tous deux assurés de mes plus profondes estime et reconnaissance, pour m'avoir si bien guidée sur ce chemin initiatique.

Je tiens également à remercier Mme Lena Sanders, M. Arnaud Banos, M. Bernard Geyer, et M. Graham Philip pour avoir tout de suite accepté de faire partie de ce jury de thèse, et de l'intérêt ainsi porté à mon travail.

N'oublions pas que ce travail est aussi, un travail en équipe : un grand merci à toute l'équipe de l'UMR ESPACE, notamment Véronique et Sonia pour leur grande disponibilité à l'égard des doctorants et pour leur gentillesse, et à Pierre-Alain et Mattéo, toujours présents pour un coup de main en SIG… Merci également à Nicolas pour m'avoir permis d'enseigner dans les meilleures conditions au département de géographie. Merci également à l'UMR CEPAM, et tout particulièrement à Gourguen Davtian, pour sa grande bienveillance.

Merci aux « anciens » doctorants Sophie, Floriane et Dorian pour leur soutien et leur amitié. Un immense merci tout particulier à Sophie pour l'aide qu'elle m'a apportée et pour m'avoir fréquemment « reboostée » lorsque j'étais en panne d'inspiration.

Une pensée pour les doctorants actuels de l'équipe, en particulier, Killian, Hadrien, et un grand merci à Alex pour ses nombreux coups de main en informatique.

Merci enfin, à tous mes amis ; à mes parents, mes grands-parents, mes petits frères Vincent et Luigi ; à Caramel, et, bien sûr, à Julien, pour leur soutien inconditionnel et leur affection.

Qu'ils ne cherchent dans ces quelques lignes la juste appréciation de tout ce qu'ils m'apportent ; celles-ci ne peuvent que très partiellement leur rendre hommage. Car,

on ne voit bien qu'avec le cœur. L'essentiel est invisible pour les yeux.

Résumé

Si le potentiel de l'analyse spatiale dans la recherche des structures et des dynamiques des systèmes de peuplement passés n'a aujourd'hui plus à faire ses preuves, tant dans les concepts que les méthodes et outils employés, il est cependant nécessaire que celle-ci intègre la complexité engendrée par les divers niveaux de connaissance que nous avons de ces systèmes. En effet, l'incertitude inhérente à notre appréhension de phénomènes passés, aux modes de collecte ou d'enregistrement des données, mais aussi de nos modes de catégorisation et de réflexion spatio-temporelles sur cette information conditionnent fortement les hypothèses et les résultats qui en découlent. Cette thèse, menée dans le cadre du projet PaléoSyr/PaléoLib, propose une chaîne de raisonnement méthodologique exploratoire destinée à révéler et formaliser par des méthodes d'analyse spatiale divers niveaux de connaissance et d'incertitude inhérents aux bases de données archéologiques, tout en proposant des alternatives destinées à s'écarter du conditionnement imposé par les catégories spatio-temporelles rigides telles que les périodes ou les limites de zones de prospection. Bien que celle-ci soit organisée en diverses étapes qui suivent le fil du raisonnement en allant du général au particulier, cette analyse est organisée en deux axes majeurs qui correspondent à deux niveaux spatio-temporels de réflexion particuliers. Le premier a pour objectif de clarifier et de synthétiser les niveaux d'information inhérents à une vaste base de données couvrant la Syrie occidentale et le Liban de -9600 av. J.-C. à nos jours. En adaptant des méthodes d'aide à la décision et d'analyse spatio-morphologique, et par des procédés de géovisualisation dans une optique exploratoire, nous évaluons divers niveaux de qualité des unités archéologiques, et explorons un nouveau mode de catégorisation spatio-temporelle destiné à visualiser sous un angle nouveau la variation spatio-temporelle de la quantité et de la qualité de l'information, basée sur les structures spatio-temporelles et sur les concepts d' « espaces flous », et prenant la forme « d'unités spatio-temporelles floues ». Le second axe de cette recherche constitue un « zoom » sur l'une de ces unités située au Nord-Ouest de la Syrie, et a pour objectif d'explorer et d'évaluer plus localement les impacts des divers niveaux spatio-temporels que révèlent les données par des méthodes d'analyse géostatistique (la variographie) et de statistique spatiale (le calcul des Local Indicators of Spatial Association) et des niveaux d'incertitude sur notre perception du changement spatio-temporel. L'objectif final étant de proposer diverses hypothèses et modèles des « passés possibles » du peuplement élaborés à l'aide de la logique et des mathématiques floues, et dont l'ouverture dépend des niveaux spatio-temporels et d'incertitude qui sont envisagés.

Abstract

The potential of the concepts, tools and methods of Spatial Analysis for researching the structures and dynamics of past settlement systems is now widely recognised. It is however necessary to integrate the complexity created by the several knowledge levels we have on these systems. We have indeed much uncertainty in our comprehension of past phenomena, generated by our ways of collecting or recording data, but also by our spatio-temporal categorisation and reflexion on this information, which greatly condition our hypotheses and results.

This thesis was carried out in the framework of PaleoSyr/PaleoLib project. It develops a methodological and exploratory chain of reasoning whose aim is to reveal and formalise with Spatial Analysis several levels of knowledge and uncertainty which are inherent to archaeological databases. It proposes alternatives to try and avoid the conditioning imposed by rigid spatio-temporal categories such as periods or survey zones. This research follows the course of the reasoning by going from the most general to the most specific, and is organised in two major axes which are two spatio-temporal particular levels of reflexion. The first one intends to clarify and synthetize several levels of information which are inherent to a big database covering Occidental Syria and Lebanon from -9600 B.C to the present. By adapting decision making and spatio-morphological methods, and through geovisualisation processes in an exploratory dimension, we evaluate several quality levels of archaeological units. Thus, we explore a new way of spatio-temporal categorisation of information quantity and quality based on spatio-temporal structures and on the concepts of "fuzzy spaces", taking the form of "fuzzy spatio-temporal units". The second axis of this research focuses on one of these units, which is situated in the North-West of Syria. Its purpose is to explore and evaluate in a more local way the impacts of the various spatio-temporal and uncertainty levels revealed by data with geostatistics (variography) and spatial statistics (the calculation of Local Indicators of Spatial Association) on our perception of spatio-temporal change. The final objective consists in proposing several hypotheses and models of the "possible pasts" of settlement with the help of fuzzy logic, where the opening of the possibilities depends on the spatio-temporal and uncertainty levels taken into account.

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE **15**

PARTIE I - CONCEPTS ET MÉTHODES POUR L'ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DES CONFIGURATIONS SPATIALES PASSÉES EN CONTEXTE INCERTAIN **19**

CHAPITRE 1 : QUELLE PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE EN ARCHÉOLOGIE ? **21**

CHAPITRE 2 : « FAIRE SCIENCE AVEC L'INCERTITUDE » : POUR UNE DÉMARCHE FLEXIBLE ET EXPLORATOIRE S'INSPIRANT DU CADRE THÉORIQUE ET MÉTHODOLOGIQUE DE LA GÉOPROSPECTIVE. **46**

CHAPITRE 3 : CONTEXTE DE LA RECHERCHE **63**

PARTIE II - CONCEPTION ET APPLICATION D'UNE MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DE LA QUALITE SPATIO-TEMPORELLE DES DONNÉES DANS LA LONGUE DURÉE. **86**

CHAPITRE 4 : ADAPTATION D'UNE MÉTHODE D'AIDE A LA DÉCISION POUR ÉVALUER LES VARIATIONS DE LA QUALITÉ DE L'INFORMATION SELON LES PÉRIODES ÉTUDIÉES. **87**

CHAPITRE 5: RÉPARTITION SPATIO-TEMPORELLE DES DONNÉES ET DE LA QUALITÉ DE L'INFORMATION ; L'APPORT DE LA GÉOVISUALISATION **113**

CHAPITRE 6 : EXPLORATION ET IDENTIFICATION DES « UNITÉS SPATIO-TEMPORELLES SIGNIFICATIVES » ; MÉTHODE D'ANALYSE SPATIO-MORPHOLOGIQUE EXPLORATOIRE. **132**

PARTIE III – « LES PASSÉS POSSIBLES » : DE L'EXPLORATION A LA MODÉLISATION *FLOUE* DES CONFIGURATIONS SPATIALES ET DU PEUPLEMENT POSSIBLES..... 168

CHAPITRE 7 : RÉGIONALISATION *FLOUE* DES CONFIGURATIONS SPATIALES DU PEUPLEMENT ET DE LEUR DYNAMIQUE TEMPORELLE..... **170**

CHAPITRE 8 : EVALUATION ET MODÉLISATION DES POSSIBILITÉS D'OCCUPATION DU SOL DANS UN CONTEXTE D'INCERTITUDE FORTE. **231**

CONCLUSION GÉNÉRALE 273

Introduction générale

Nous ne sommes pas des immigrés qui tenteraient de faire « clandestinement», chez les historiens et les archéologues, de la géographie.

Gérard CHOUQUER, 2003

La collaboration des archéologues et des géographes sur le terrain de l'analyse spatiale, au sein de programmes de recherche transdisciplinaires ayant pour objectif de comprendre et modéliser les dynamiques de changement et de transmission des formes spatiales, remonte aux années 1990 (Fiches, Van Der Leeuw, 1989 ; ARCHAEOMEDES, 1998 ; Robert, 2012). Plus récentes sont cependant les tentatives de conceptualisation et de traitement de l'incertitude, qui, elles, ont émergé au cours des années 2000, en archéologie et en géographie en Europe et aux Etats-Unis (Barceló, 2009).

Il est cependant plus rare qu'une même étude ou qu'un programme de recherche rassemble à la fois une problématique historique, archéologique et environnementale au sens thématique, et l'élaboration d'une méthodologie destinée à l'aborder sous un angle spatial (ou, plus justement, spatio-temporel) tout en explorant et surtout, en intégrant dans la modélisation les multiples dimensions d'incertitude qu'elle comporte. Ce sont ces divers aspects que nous souhaitons ici réunir.

L'origine des questionnements qui nous ont conduite à cette recherche remonte à notre participation, durant deux années, à une mission archéologique[1] dont l'intérêt porte sur le peuplement nomade d'Asie Centrale. Alors que nous étions encore totalement béotienne, nos deux séjours de recherche de terrain en Mongolie en 2010 et 2011 nous ont familiarisé avec l'univers archéologique, c'est-à-dire les méthodes, les types de raisonnement et les questionnements des archéologues, mais aussi avec ce que ces derniers attendent des géographes sur le terrain ou en laboratoire. La richesse des questionnements, mais aussi celle du potentiel de l'analyse spatiale –notamment spatio-morphologique- pour proposer des réponses nous sont aussitôt apparus (Voiron-Canicio et al., 2011). Alors que de retour au laboratoire, nous découvrions l'existence de l'axe disciplinaire de l' « archéologie spatiale » ou « archéologie des espaces » (Fiches, Van Der Leeuw, 1989), le fort conditionnement de la pensée -et de nos propres

[1] Mission archéologique conjointe Monaco-Mongolie, dirigée par Mr Jérôme Magail.

résultats- par la rigidité des catégories temporelles (la périodisation) et spatiales (les limites des zones de prospection) mobilisées nous ont rapidement interrogée. Une tendance à considérer les Systèmes d'Information Géographique (SIG) comme une panacée dépassant le statut d'outil au service de nos questionnements, mais orientant désormais les questionnements en fonction des possibilités qu'ils offrent, nous a également interrogée; tout comme le fait que les résultats qui en sont issus ne soient généralement discutés que sous un aspect thématique et non véritablement méthodologique, ou du point de vue de leurs propres conditionnement et incertitude.

C'est au Proche-Orient, au sein du programme PaléoSyr/PaléoLib, que nos questionnements ont trouvé un cadre de recherche et d'échange interdisciplinaire fructueux : l'hétérogénéité de la qualité des informations contenues dans la vaste base de données du programme, et la diversité des équipes de recherche qui l'alimentent à l'échelle de la Syrie et du Liban conduisaient alors les chercheurs à remettre en question la comparabilité et la fiabilité des données, et donc des hypothèses et des modèles d'occupation du sol qui en découlent.

C'est dans ce contexte que notre projet a véritablement pris forme: si notre objectif thématique consiste à comprendre et à définir les structures et les dynamiques spatio-temporelles d'anciens systèmes de peuplement –comme souvent en « archéologie spatiale »-, notre ambition réside dans l'évaluation du conditionnement imposé par les catégories spatio-temporelles et l'incertitude relatives aux données archéologiques mais aussi à nos propres modes de raisonnement sur ces données. Cette évaluation prend la forme d'un protocole méthodologique d'analyse spatiale exploratoire destiné à s'écarter de ce conditionnement ou tout au moins, à en proposer une approche différente, résolument spatio-temporelle, s'inscrivant notamment dans le cadre théorique et méthodologique flexible mais rigoureux du *flou*. L'aboutissement de cette chaîne de raisonnement exploratoire consistera à envisager et à modéliser le peuplement passé sous forme de *possibles* relatifs aux différents types de configurations spatiales identifiées mais aussi aux échelles spatio-temporelles et aux niveaux de qualité de l'information mobilisés dans la constitution de ces modèles.

Après une identification des problématiques et enjeux méthodologiques rencontrés aujourd'hui dès lors que l'on s'intéresse aux structures et aux dynamiques spatio-temporelles de peuplement dans la longue durée et dans un contexte incertain (chapitre 1), nous avons recherché et associé dans le second chapitre les divers socles théoriques et méthodologiques sur lesquels nous souhaitons nous appuyer afin d'en proposer un éclairage original et éventuellement, de tenter de contourner certains écueils évoqués dans le premier chapitre. Nous avons ainsi par exemple

emprunté à la géoprospective, pour ses nombreuses similitudes avec les aspects de l'archéologie qui nous intéressent ici, son cheminement exploratoire dans l'incertitude. La formalisation possibiliste sera quant à elle inspirée des théories de la complexité et de la logique floue. Le contexte dans lequel est menée cette recherche ainsi que la base de données associée, sont présentés dans le chapitre 3.

La seconde partie de cette étude s'attache à la compréhension et à la clarification de la base de données, et à la formalisation des divers niveaux spatiaux, temporels et d'incertitude qu'elle implique. Le chapitre 4 a pour objectif de proposer une vue synthétique et globale de la base de données, et des variations de la qualité et de la quantité d'information en fonction de la chronologie. Les chapitres suivants ont pour objectif de tenter de déconstruire le découpage en périodes de la chronologie (chapitre 5) ainsi que le découpage spatial en zones de prospection (chapitre 6) pour en reconstruire de nouveaux à partir de la recherche des structures spatiales sous forme de « régions spatio-temporelles *floues* ». Les divers résultats produits ont été animés sous forme de vidéos proposant une approche dynamique du changement spatio-temporel, consultables en ligne sur le site MédiHal[2].

La troisième partie de cette étude consiste à « zoomer » sur un espace déterminé à partir de la régionalisation établie précédemment, et à en étudier plus finement par des méthodes de statistique spatiale et de géovisualisation les structures et les dynamiques spatio-temporelles se déclinant en fonction des divers niveaux spatio-temporels et d'incertitude mobilisés (chapitre 7). A partir de l'information créée, il s'agit de proposer une modélisation des « passés possibles », c'est-à-dire des possibilités d'occupation du sol des zones non connues car non prospectées par les archéologues, en se basant sur la logique et les mathématiques floues.

Cette recherche est donc tout d'abord méthodologique, en ce qu'elle propose le développement d'une méthode exploratoire allant du général au particulier, permettant de mettre en évidence les divers niveaux spatio-temporels et d'incertitude inhérents à une base de données vaste et hétérogène, et de mobiliser ces divers niveaux d'information jusqu'à un processus de modélisation possibiliste. L'objectif est en outre de formaliser et de « baliser » le cadre interprétatif archéologique, afin que les hypothèses thématiques et les comparaisons formulées par les archéologues tiennent compte des niveaux spatio-temporels et d'incertitude mis en jeu.

[2] Version de Hal, site scientifique d'archives ouvertes, destinée aux médias (images, vidéos…).

PARTIE I - Concepts et méthodes pour l'analyse spatio-temporelle des configurations spatiales passées en contexte incertain

L'incertitude devient viatique : le doute sur le doute donne au doute une dimension nouvelle, celle de la réflexivité ; le doute par lequel le sujet s'interroge sur les conditions d'émergence et d'existence de sa propre pensée constitue dès lors une pensée potentiellement relativiste, relationniste et auto-connaissante. Enfin l'acceptation de la confusion peut devenir un moyen de résister à la simplification mutilatrice. Certes, la méthode nous manque au départ ; du moins pouvons-nous disposer d'anti-méthode, où ignorance, incertitude, confusion deviennent vertus.

Edgar MORIN, 1977

Chapitre 1 : Quelle prise en compte de l'incertitude en archéologie ?

Chapitre 2 : « Faire science avec l'incertitude » : pour une démarche flexible et exploratoire s'inspirant du cadre théorique et méthodologique de la géoprospective.

Chapitre 3 : Contexte de la recherche

Chapitre 1 : Quelle prise en compte de l'incertitude en archéologie ?

INTRODUCTION

En 1997, Gary Lock et Trevor Harris soulignaient le poids de l'incertitude en science, notamment en archéologie où les données sont la plupart du temps fragmentaires et difficiles à dater. Cette thématique fut reprise en 2013 par Bevan et al.: « One final, complicating factor for archaeologists is the fact that archaeological observations are very partial, imperfect records of past activity. Much of the variability in our observed spatial patterns in archaeology is due to patchy levels of archaeological preservation and investigation».

Ces dix dernières années l'incertitude évoquée par ces auteurs n'a fait qu'augmenter ; les données générées par les fouilles et les prospections se sont accumulées, les méthodes et techniques permettant d'y accéder se sont diversifiées, et les efforts de modélisation spatiale se sont multipliés, bénéficiant de la diffusion des Systèmes d'Information Géographique (SIG) devenus alors d'usage courant en archéologie (De Runz, 2008 ; Bradbury, Lawrence, 2012). Cette énumération peut apparaître étonnante : en quoi ces éléments qui relèvent d'une avancée technique peuvent-ils être des facteurs d'incertitude ? Les archéologues doivent en fait aujourd'hui composer avec des bases de données très vastes, dont les données sont de natures, de précisions et de fiabilités hétérogènes. Le développement de programmes de recherche interdisciplinaires, associant archéologues et géographes, a également poussé ceux-ci à élargir les échelles d'étude, se voyant parfois dans l'obligation de fusionner plusieurs bases de données issues de missions archéologiques différentes afin de passer des analyses à échelle locale, à celles de la région voire du pays. Cette démarche a créé une forte disparité des cadres interprétatifs, des schémas de datation et des méthodes d'acquisition des informations au sein même de la base de données la rendant ainsi « indigeste » (Orton, 2010), et accroissant encore son hétérogénéité (Bradbury, Lawrence, 2012). Initialement perçue comme un moyen de pallier le manque d'informations et l'incertitude inhérents à la démarche archéologique, cette accumulation de données l'a finalement elle-même générée, introduisant des biais considérables dans la recherche des structures et des dynamiques spatiales des systèmes de peuplement passés (Tableau 1). Il ne s'agit pas ici de jeter le discrédit sur les méthodes et techniques archéologiques ni sur les bases de données qui en résultent, mais de discuter l'utilisation qui en est faite : « databases are very useful

in recording archaeological data and using them in every day's archaeological practice is an achievement that should be not discussed. But a naive use may lead, in a few cases, to incorrect conclusion» (Nicolucci et al., 2001).

Tableau 1 - La révolution des données massives (d'après Banos, 2013)

Données traditionnelles	Données «massives»
Structurées	Peu structurées
Sémantiquement riches	Sémantiquement pauvres
Peu nombreuses	Massives (Big Data)
Propriétés connues	Hétérogènes, bruitées, incomplètes, multi-sources
Rares	Flux continu

Un nombre croissant d'archéologues, s'associant à des chercheurs issus d'autres disciplines, ont pris conscience de la nécessité et de l'urgence de s'attaquer à cette question de l'incertitude dans leurs bases de données, et de sa propagation dans les analyses et les résultats. On ne se contente ainsi plus aujourd'hui simplement d'y faire allusion ; des tentatives de description et de quantification de l'incertitude ont récemment vu le jour, notamment au sein de programmes de recherche tels qu'ArchaeDyn[3] (Favory, Nuninger, 2008), Fragile Crescent[4] (Galiatsatos et al., 2009) et Vanishing Landscape of Syria[5], PaléoSyr[6], ou des Groupes de recherche tels que Modys[7]. Des tables-rondes et des écoles thématiques interdisciplinaires débattent également régulièrement de cette problématique, et plutôt que de faire poindre un consensus, celles-ci nous renvoient toujours plus à la multiplicité des facettes, des dimensions et des définitions de l'incertitude.

A la lecture de différentes études d'archéologie publiées ces dernières années, nous avons relevé des attitudes très différentes vis-à-vis de ces questionnements :

[3] Projet ArchaeDyn : Dynamique spatiale des territoires de la Préhistoire au Moyen-Âge. Resp. : FAVORY, F., NUNINGER, L. (2005-2007). Maison des Sciences de l'Homme et de l'Environnement Ledoux. http://mshe.univ-fcomte.fr/poles-de-recherche/dynamiques-territoriales/axe-1-construction-des-territoires-dans-la-longue-duree/archaedyn. Consulté le 11/09/2015.

[4] The Fragile Crescent Project: Settlement Change during the Urban Transition. Resp. WILKINSON, T. (2008). University of Durham. https://www.dur.ac.uk/fragile_crescent_project/. Consulté le 11/09/2015.

[5] Vanishing Landscape of Syria: Ground and space mapping of a diverse world. Resp.: PHILIP, G. https://www.dur.ac.uk/archaeology/research/projects/all/?mode=project&id=362. Consulté le 11/09/2015.

[6] ANR – PaléoSyr : Paléoenvironnements et occupation du sol- en Syrie occidentale durant l'Holocène. Resp.: GEYER, B. http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-10-BLAN-2003. Consulté le 11/09/2015.

[7] GDR 3359 Modélisation des Dynamiques Spatiales. Dir. : RODIER, X. (2010-2013). http://isa.univ-tours.fr/modys/index.php. Consulté le 11/09/2015.

a) Une indifférence totale ;
b) Une volonté croissante de décrire et de quantifier l'incertitude inhérente à l'information disponible –plus rares sont les études qui intègrent véritablement ces paramètres dans les modèles ;
c) Une tendance à qualifier nos propres dysfonctionnements théoriques et méthodologiques sous le terme d' « incertitude » (cette attitude n'étant pas incompatible avec la précédente, ce qui génère parfois des situations circulaires embarrassantes où le chercheur cherche à quantifier l'incertitude issue d'une confusion qu'il a lui-même involontairement introduite dans son raisonnement).

Cette dernière attitude est intéressante en ce qu'elle est révélatrice des écueils liés à la grande diversité des dimensions de l'incertitude évoquée précédemment, et qui peut nous pousser désormais consciemment ou non, à dissimuler nos propres défaillances théoriques ou méthodologiques en invoquant de l' « incertitude ».

Nous ne nous situerons pas dans cette étude dans le courant d'une « grande » définition de « l'incertitude », parmi une multitude d'autres qui seraient certainement tout aussi pertinentes. Les dimensions qu'elle prend dans le cas pratique qui nous occupe dans la seconde partie de cette étude, seront définies lors de la description de notre base de données, et tout au long des traitements. Quant aux diverses facettes de l'incertitude des données archéologiques et géographiques, celles-ci ont été décrites très précisément par Cyril de Runz dans sa thèse de doctorat (De Runz, 2008). A partir des informations rassemblées dans le Tableau 2, élaboré d'après les travaux de Fischer (2005), inventoriant les divers types et causes d'erreurs qui sont sources d'incertitudes dans une base de données géographique, Cyril de Runz étend ce raisonnement aux bases de données archéologiques (Tableau 3).

Tableau 2 - Types et causes d'erreurs qui sont sources d'incertitudes dans une base de données géographiques (De Runz, 2008, d'après Fischer, 2005)

Types d'erreurs	Causes de l'erreur
De mesure	La mesure d'un objet est erronée (localisation)
De classement	L'objet est affecté à une mauvaise classe d'objets à cause d'une erreur dans l'expertise
De regroupement de classes d'objets	L'objet est regroupé avec des objets aux propriétés différentes
De généralisation spatiale	Généralisation de la représentation cartographique de l'objet avant numérisation (déplacement, simplification, échelles d'approches)
D'enregistrement	Mauvais codage en entrée du SIG
Temporelle	L'objet a changé de caractéristique entre la date d'enregistrement dans la base et celle de son utilisation
De traitement	Une erreur est causée pendant le traitement par un arrondi ou une erreur algorithmique

Tableau 3 - Types et causes d'erreurs sources d'incertitudes dans une base de données spatiales contenant des objets archéologiques (De Runz, 2008)

Types d'erreurs	Causes de l'erreur
De mesure	La mesure spatiale (localisation) ou temporelle (période d'activité) d'un objet est erronée
De classement	L'objet est affecté à une mauvaise classe à cause d'une erreur dans l'expertise
De regroupement de classes	L'objet est regroupé avec des objets aux propriétés quelque peu différentes
De généralisation spatiale ou temporelle	Généralisation de la représentation cartographique ou temporelle de l'objet avant numérisation (déplacement, simplification, échelles d'analyse)
D'enregistrement	Mauvais codage en entrée du SIG
De traitement	Une erreur est causée pendant le traitement par un arrondi ou une erreur algorithmique

Dans un esprit de synthèse, Cyril de Runz propose également une typologie des imperfections rencontrées dans les données archéologiques, qu'il présente dans la Figure 1, et faisant l'objet du premier chapitre de sa thèse.

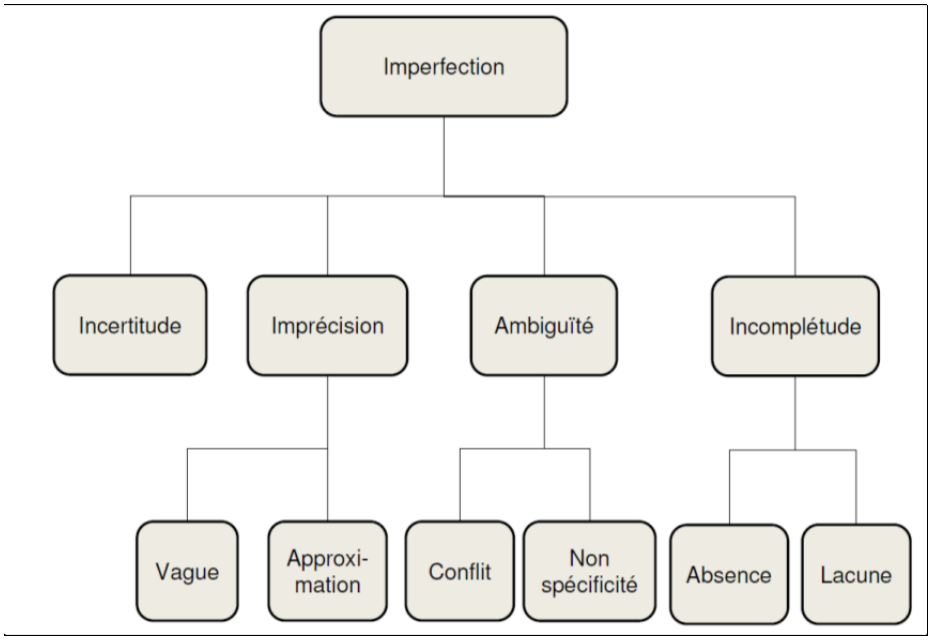


Figure 1 - Typologie de l'imperfection des données archéologiques (De Runz, 2008)

Dans le contexte qui vient d'être évoqué, il nous semble plutôt fondamental de nous attarder sur ce que l'incertitude *n'est pas* ; ou plutôt, sur ce qui n'est pas de l'incertitude.

Il sera donc question, dans cet état de l'art, de distinguer ce qui relève bel et bien d'informations incertaines (et dans ce cas, de discuter la manière dont celles-ci ont été abordées) de ce qui relève de considérations théoriques et méthodologiques non appropriées ou défaillantes, afin d'éviter de s'acharner à tenter de résoudre de faux problèmes, tout en dissimulant les réelles problématiques.

1. QUANTITE ET FIABILITE DES DONNEES : DEUX DIMENSIONS A CONSIDERER

1.1 Des modèles exempts de pondération des données

Selon Benoît Chevrier, « le degré de précision auquel il est possible de prétendre est dépendant de la quantité de données disponibles » (Chevrier, 2012). Nous ajouterons à cette remarque, que la fiabilité de ces données constitue également un paramètre essentiel à prendre en compte avant d'entreprendre toute démarche de modélisation. S'abstenir de cette réflexion nous mène inévitablement à des dangers parfaitement illustrés dans nombre d'interprétations, de modèles et de paradigmes, pourtant perçus comme des références et dont les études qui s'y réfèrent propagent inévitablement les erreurs.

C'est ce que cet auteur montre en dénonçant le peu de fiabilité et la faible quantité de données sur lesquelles est basé le célèbre modèle Out of Africa, correspondant à « l'hypothèse de sorties

successives d'hominidés de l'Afrique de l'Est vers le reste du Vieux Monde » (Chevrier, 2012), « régissant les raisonnements liés à la diffusion de population et l'innovation au Paléolithique » (Chevrier, Koehler, 2013). Malgré ces défaillances fondamentales, ce modèle est pourtant « généralement admis et relativement consensuel « (Chevrier, 2012).

Cette pratique peut être observée également chez nombre d'archéologues étudiant le Proche-Orient. En effet, l'identification de « chocs » et de « crises » climatiques (dont les « évènements » 4.2 à 3.9, et 3.5 à 2.5 (Kaniewski et al., 2008)) est immédiatement reliée à l' « effondrement » de sociétés, sans que l'on s'interroge suffisamment sur la fiabilité et la répartition spatio-temporelle des données archéologiques et paléo-climatiques dont sont issues ces observations (Weiss, Bradley, 2001; Kaniewski et al., 2008; Migowski et al., 2006; Mayewski et al., 2004), ni par ailleurs, sur la capacité d'adaptation des sociétés au changement climatique. Ces études sont sur-simplificatrices à la fois dans la représentation et l'interprétation des données climatiques et archéologiques (Rosen, 2008) et visent le sensationnalisme à l'heure où le terme de « crise », notamment climatique, est fortement d'actualité. Arlene Miller Rosen (2008) appelle en outre à une prise en compte de la diversité des données, même de celles qui ne vont pas forcément dans le sens de la « crise » : «although some archaeological proxies may suggest dramatic changes, others might give contrasting indications».

Martin Finné et al. ont mené dans ce sens une démarche de pondération des données environnementales à l'échelle de la Méditerranée orientale et d'estimation des incertitudes (Finné et al., 2011), montrant bien la disparité spatiale des données climatiques et archéologiques à l'origine de ces affirmations, et nuançant l'impact potentiel de la variabilité du climat sur les sociétés de méditerranée orientale durant les 6 derniers millénaires.

1.2 Les « cartes de confiance » pour visualiser simultanément quantité et fiabilité des données

Le programme de recherche ArchaeDyn I a développé une méthode de pondération des données archéologiques, affirmant que « dès lors que l'on se propose de spatialiser des phénomènes, il importe de s'assurer de la qualité de l'information mise en œuvre dans les traitements » (Favory, Nuninger, 2008). Des « cartes de confiance » ont été élaborées pour « être en mesure d'expliquer la sur-représentation de certains secteurs, la sous-représentation d'autres, en fonction des conditions de constitution des inventaires et de mesurer l'impact sur la répartition des données des biais mis en évidence sur les cartes de fiabilité » (Nuninger, Favory, 2007). Ainsi, ces cartes constituent une synthèse entre des cartes de représentation permettant de « comparer la densité

des découvertes au sein d'un maillage régulier de la zone étudiée au nombre de points que recevrait chaque maille en cas d'homogénéité de la répartition des découvertes (valeur théorique = nombre de sites/nombre de mailles) » (Favory, Nuninger, 2008), et des cartes de fiabilité décrivant divers niveaux d'intensité et de difficulté de la prospection sur la zone d'étude (figure Figure 2).

La démarche ici évoquée consiste donc à représenter une forme d'incertitude particulière, traduisant l'incomplétude des données archéologiques. L'information créée permet donc plus d'interpréter l'absence ou le faible nombre de données dans une zone particulière, plutôt qu'une estimation des différents niveaux de fiabilité de la donnée disponible. Elles permettent donc de répondre à la question -fondamentale: une zone où le nombre de données est faible est-elle une zone de faible occupation, ou une zone peu prospectée ? En revanche, elles ne permettent pas d'estimer le degré de validité – notamment temporelle et morphologique - des données archéologiques.

Cette démarche consiste à visualiser l'incertitude, mais ne permet pas de l'intégrer dans l'analyse spatiale ou la modélisation des dynamiques spatiales. L'information créée est donc un outil de réflexion, invitant à une prise de distance indispensable vis-à-vis des données, mais ne consiste pas en une démarche d'intégration à part entière de l'incertitude dans les analyses.

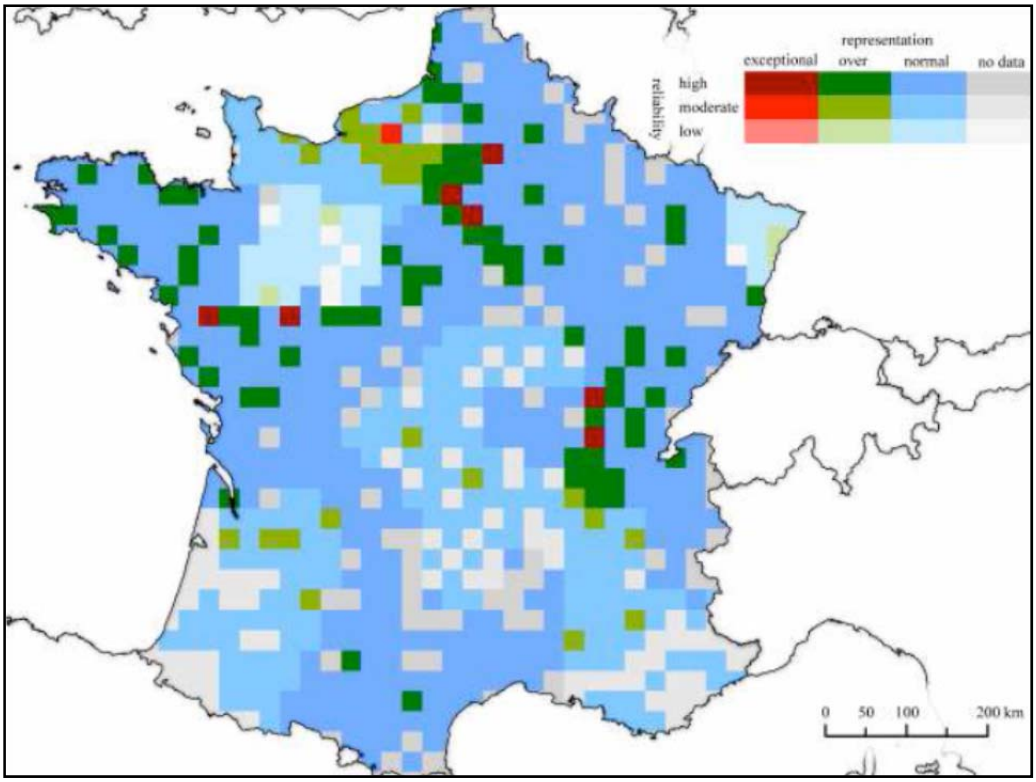


Figure 2 - Carte de confiance des artefacts datés de l'âge du bronze en France (Ostir et al., 2008)

2. L'ELABORATION DE LA CHRONOLOGIE : INCERTITUDE OU CONFUSIONS METHODOLOGIQUES ?

Pour reprendre l'image amusante mais évocatrice de Bevan et al. (2013): « Temporal uncertainty is an elephant in the room of much archaeological interpretation ». L'incertitude liée à la temporalité sous toutes ses formes constitue en effet une source d'incertitude majeure dès lors que les données que l'on manipule témoignent de phénomènes révolus et impossibles à reproduire et à revisiter.

Il convient de préciser que nous ne discuterons pas ici de la précision ou de la fiabilité des différents modes de datation des objets archéologiques : cela dépasse notre domaine de compétence, et ne constitue pas une problématique centrale de cette étude. Notre point de vue ne se situe pas au niveau de l'objet archéologique en lui-même, mais de la construction des modèles réalisés à partir de la masse de ces différents objets et de la portion de « réalité » qu'ils traduisent.

« La production de chronologie est la première étape de la démarche archéologique. En effet, si celle-ci vise plus largement à la connaissance des sociétés à travers les traces matérielles qu'elles ont laissées, l'interprétation historique et sociale de ces traces nécessite au préalable de déterminer leur place dans le temps » note Bruno Desachy (Desachy, 2012). Stephen Plog et Jeffrey Hantman (1990) soulignent dès lors constater toute la difficulté de la démarche chronologique,

puisque les archéologues doivent à la fois créer et interpréter leurs propres schémas temporels, sur lesquels reposent en outre toutes leurs études. Les mêmes auteurs évoquent ainsi la nécessité d'un équilibre entre méthode et théorie dans la construction de la chronologie, qu'ils regrettent de ne pas voir plus souvent dans les études, cette lacune étant selon eux à l'origine du manque d'innovation dans ce domaine (Plog, Hantman, 1990). Vingt-deux ans plus tard, Enrico Crema soulève des défaillances similaires dans la démarche: «When we infer something about the process of change in an archaeological phenomenon, our assessment of time is often restricted to introductory and concluding narratives, rarely reaching the core section of a paper in a formalised and quantitative manner» (Crema, 2012).

Enrico Crema regrette que ces schémas, pourtant fondamentaux puisqu'il s'agit du socle, de la base de toute étude d'archéologie, soient peu traités pour eux-mêmes, et restent bien plus souvent implicites ou consensuels. Ainsi, notre objectif est ici de «décortiquer» certains schémas de pensée et de modélisation du temps aboutissant à l'élaboration des «chronologies» sur lesquelles se basent les études d'archéologie. Ces modes de pensée et les modèles chronologiques qui en résultent sont en effet bien souvent prisonniers d'un double fonctionnement circulaire, «victimes» de l'incertitude des données qui à la fois permettent de les construire et dont ils permettent par la suite de révéler une propriété –temporelle-, et générateurs d'incertitude par les schémas de pensée et de modélisation souvent fixistes et réducteurs dont ils sont issus. L'intérêt est donc ici porté sur les modes de construction et de déploiement de la frise du temps.

2.1 Une information temporelle discontinue et incertaine

2.1.1 Datation relative : un décalage entre localisation spatiale et localisation temporelle des objets archéologiques

Il nous semble important de rappeler succinctement la façon dont sont élaborées les chronologies à partir de datations relatives, afin de ne pas omettre la première « maille » du raisonnement, établissant le lien entre le travail de terrain de l'archéologue et son travail en laboratoire.

Selon Philippe Husi, «La céramique est, avant tout, un témoin du passé dont l'objet est de répondre à des questions historiques aussi diverses que l'évolution des réseaux d'échanges, les mœurs de la vie domestique, les transformations et les innovations dans l'artisanat. Avant de devenir une source archéologique utile au discours historique, elle est un des instruments privilégiés de la datation en archéologie, conséquence de son évolution typologique rapide, de son omniprésence et de son indestructibilité» (Husi, 2001). On pourrait d'ailleurs tenir le même

discours à propos du matériel lithique. C'est donc par l'élaboration de typologies d'objets à partir des fragments découverts sur le terrain dans des situations géographiques précises, que les chronologies relatives sont réalisées.

Dans le cas de la céramique, l'ensemble des fragments dont la forme est reconnaissable est rapporté à une typo-chronologie régionale établie à partir des résultats des fouilles de sites stratifiés. Chaque couche de la stratification identifiée dans ces sites renferme un certain répertoire de formes céramiques, assemblage qui va prendre une place en chronologie relative par rapport aux répertoires des couches supérieures et inférieures. Si l'on parvient à dater la couche dans un système calendaire absolu -par le C14 ou par des références externes, textuelles par exemple- on peut proposer des fourchettes de datation pour le répertoire céramique associé. De proche en proche, on constitue ainsi des séries temporelles plus ou moins complexes. Nous obtenons par conséquent les éléments suivants : 1) une région de référence dans laquelle on observe une certaine homogénéité des répertoires et des «cultures céramiques», 2) des sites stratifiés de référence, et 3) des répertoires céramiques datés par leurs éléments associés à des contextes archéologiques datés en absolu. L'ensemble des fragments de céramiques analogues retrouvés lors de la prospection ou de la fouille d'autres sites est classé sur ces références, et on en déduit que le site a pu être occupé dans les périodes de référence auxquelles on peut rattacher chaque fragment.

Ce que l'on peut dire à propos de cette procédure est que chaque «frise» chronologique est à la fois le résultat et le révélateur d'une échelle spatiale particulière: celle de la zone prospectée, et de la zone choisie comme « référence ». Chaque mission archéologique dispose donc de son propre modèle temporel, qu'il est très difficile d'aborder selon une optique comparative avec celui d'autres missions, étant données les disparités des modes et des intensités de prospection et de datation des données, contribuant ainsi à l'hétérogénéité des bases de données –entre les diverses bases de données, et au sein d'une même base de données. C'est ce qu' Enrico Crema exprime par cette phrase: «we are dealing not with time itself but with measurable variables that act as the kernel of different models of time» (Crema, 2012).

Le danger est que chaque modèle ou frise chronologique deviennent autant de carcans, desquels s'extraire devient de plus en plus difficile à mesure que les données s'y accumulent: ainsi, la nouveauté, les signaux faibles, voire l'inattendu peuvent être lissés et forcés de «rentrer» dans les «boîtes» rigides de référence du modèle chronologique. Ces « boîtes » ou phases peuvent être cependant affinées et remises en question quand un archéologue décide de reprendre et de reclasser tout le matériel découvert depuis un certain temps afin d'approfondir une période ou un

type de structure : c'est ce que firent par exemple respectivement Jérôme Rohmer (Rohmer, 2013) et Jennie Bradbury (Bradbury, 2011) dans leurs thèses de doctorat. C'est également l'objectif du projet international ARCANE[8], dont le but est de produire une chronologie relative et absolue fiable pour le Proche Orient, basée sur la synchronisation de chronologies régionales, pour le troisième millénaire avant J.-C[9].

Bruno Desachy propose de développer une archéologie prenant en compte l'incertitude dans son raisonnement de datation dès la phase de terrain : «Le raisonnement chronologique de terrain est confronté à l'incertain dès l'observation stratigraphique ; et la formalisation doit, à notre sens, en tenir compte» (Desachy, 2012). Il propose une méthode basée sur des outils mathématiques simples, permettant de « tenir compte de l'incertitude parfois liée aux observations stratigraphiques (à cause de leur nature empirique) et de l'imprécision des données de temps quantifié. Ne pas nier cette incertitude renforce la validité scientifique du raisonnement » (Desachy, 2012).

En outre, ces considérations nous renvoient au fait que le temps – et donc, la recherche des dynamiques spatio-temporelles passées – dépend de la découverte d'objets archéologiques évoquant des zones spatio-temporelles d'homogénéité et de rupture, et dont la somme permet d'élaborer une chronologie. Mais dans le cas de datations relatives, le travail de terrain par lequel la chronologie est élaborée ne permet que de proposer des fourchettes de datation plus ou moins larges, générant une forte imprécision quant à la localisation temporelle de l'objet en question. Ce problème crucial est abordé par Ian Johnson, qui rapproche l' «évènement» archéologique (dépôt d'un artefact ou construction d'un bâtiment, utilisation ou abandon d'une structure) d'une scène de crime: «we normally know their location with some accuracy, but can only locate them temporally between a terminus post quem (the last known pre-incident moment or, for artefacts, the start of the known period of production of the artefact) and a terminus ante quem (the moment when the incident was discovered or, for artefacts, the likely end of production and/or deposition)» (Johnson, 2003). Il en découle ainsi un décalage considérable entre notre connaissance (et donc notre marge de manœuvre), sur la localisation spatiale, connue avec précision, et la localisation temporelle des objets archéologiques, il convient de garder ce fait à l'esprit au moment des analyses.

[8] Associated Regional Chronologies for the Ancient Near East and the Eastern Mediterranean. http://www.arcane.uni-tuebingen.de/index.html
[9] http://www.arcane.uni-tuebingen.de/presentation.html, consulté le 11/09/2015

2.1.2 La périodisation : un postulat conditionneur et implicite

Découper le temps constitue l'une des démarches, pour ne pas dire des réflexes, de l'historien. C'est en effet par l'intermédiaire de ce classement sous forme de période que le chercheur se libère du désordre des faits, et qu'une architecture s'élabore (Valéry, Dumoulin, 1992), rendant de ce fait le passé intelligible. Cependant, et malgré l'étendue de cette pratique, la périodisation demeure bien souvent un impensé de l'historien qui « choisit entre ses réalités chronologiques, selon des préférences et exclusives plus ou moins conscientes » (Braudel, Colin, 1987), et de ce fait « reste tributaire de catégories temporelles subies plutôt que réfléchies » (Müller, 1993). Les biais qu'elle comporte doivent pourtant être soulignés.

En effet, « au-delà de la description, ces césures temps constituent de véritables catégories d'interprétation du réel qui reflètent les présupposés philosophiques, culturels et sociaux de leurs utilisateurs » (Valéry, Dumoulin, 1992). Les périodes apparaissent comme des cadres de pensée essentiels mais dangereux en ce qu'ils proposent une perception du monde –de l'espace-temps-particulière, à la fois produits et producteurs de la pensée de l'analyste. Toute tentative de périodisation est ainsi un postulat, qui ne peut donc se passer d'un effort de conscientisation et de justification, pourtant majoritairement implicite et esquivé (Müller, 1993).

La périodisation peut, dans ce contexte, difficilement éviter l'écueil du conditionnement des analyses : trop vouloir classer et ordonner le chaos des données peut nous conduire à une conception linéaire et rigide du passé, qui « dissimule mal la quête obstinée d'un sens de l'histoire » (Valéry, Dumoulin, 1992), laissant peu de liberté au chercheur et aux résultats. Il est difficile dans ce cas d'échapper à un raisonnement circulaire où le chercheur postule – implicitement, par la périodisation qu'il crée ou qu'il utilise- ce qu'il cherche à interroger. Ce positionnement est exprimé par Burguière *et al.* dans le *Dictionnaire des sciences historiques* (1986) : « Aujourd'hui, cette périodisation canonique et presque fossile enferme la recherche et l'enseignement de l'histoire dans un carcan que concours, solidarités corporatistes et structures universitaires renforcent ».

Si la périodisation laisse, une fois établie, peu de liberté, celle-ci est toutefois bien souvent issue de manipulations très -voire trop- libres du chercheur, qui dans sa « quête obstinée d'un sens » ordonne à outrance et biaise son modèle chronologique : « de dérapage en glissement, l'historien touche, étend, rétracte ses Kondratieff, élabore de petits âges glaciaires, étire ses siècles selon ses besoins. Véritable démiurge, il prétend transformer le réel chaque fois qu'il triche avec ses instruments de mesure ; mais il est l'esclave de ses créatures » (Valéry, Dumoulin, 1992). Daniel S. Milo (1991) insiste également sur ce dernier point : « Le Tout n'est pas appréhendable, il faut le

décomposer pour l'étudier. Par un processus souvent analysé, les morceaux ainsi créés sont investis d'une existence- voire d'une essence- dont on aura le plus grand mal à se débarrasser ». Une fois le modèle chronologique établi, s'affranchir de celui-ci devient en effet extrêmement difficile, voire impossible : les chronologies relatives des archéologues étant établies sur un modèle chronologique de référence, les données qu'ils recueillent et la base de données qu'ils constituent dépendent entièrement de ce système de classement dans lequel elles sont figées.

2.1.3 Une approche du changement artificielle et saccadée

Cette approche de la périodisation présente en outre une vision très artificielle du changement. En effet, le passage abrupt d'une période à une autre –fondé sur le passage d'un type de céramique à un autre, par exemple- matérialise une vision du changement par paliers, avec des périodes de stabilité entrecoupées de courtes périodes de changement (Plog, Hantman, 1990). Ainsi, « la pensée se représente une « flèche du temps » divisée par des coupures, des discontinuités, qui marquent le passage d'un état du monde à un autre état du monde » (Fourquet, 1994). Savoir de quel « monde » on parle dans l'établissement d'une chronologie est déjà une affaire complexe : leur spatialité étant fondée sur la répartition d'un certain type d'artefacts –les tessons de céramique- ou sur des données ponctuelles –carottages, fouilles- un amalgame peu rigoureux des échelles spatio-temporelles peut bien vite se présenter dès lors qu'on souhaite dépasser l'analyse de site. François Fourquet (1994) poursuit : « Le passage n'existe pas vraiment dans le temps ; il serait instantané, que cela ne changerait rien à l'affaire ; seul compte, pour l'esprit, le fait qu'il y ait passage, rupture, changement d'état ou de structure ». Norbert Elias (1996) fait le même constat : « La prédominance d'une conception du passé comme histoire favorise en fait la perception des discontinuités. Elle habitue l'homme à considérer le passé comme une multitude de périodes non reliées les unes aux autres».

C'est en outre ce sentiment qui a très certainement favorisé en archéologie une pratique accrue de « l'art de la transition », dans « la construction d'une successivité entre l'avant, le pendant et l'après »[10]. Bien que l'introduction de ces temps « intermédiaires » ait vocation à nuancer les passages parfois brutaux entre deux périodes distinctes, elle peut également s'accompagner d'un biais considérable : celui de hiérarchiser des temps, des espaces et des phénomènes passés selon des critères actuels. Les périodes –et espaces- de transition n'auraient donc de raison d'être que par rapport à un avant et à un après que l'on identifie après coup. En outre, distinguer des

[10] Appel à communications du 12e colloque annuel de la Maison Archéologie Ethnologie, « Transitions historiques : rythmes, crises, héritages ». Organisé par ALLARD, P., HEINTZ, M., MÜLLER, C., 10-11-12 juin 2015, Université Paris Ouest Nanterre la Défense.

« périodes de transition » des « périodes-tout-court » introduit une ambiguïté dangereuse, en nous conduisant à imaginer des « périodes processus » et des « périodes-état », où la stabilité semble régner. Le changement au cours du temps serait donc envisagé comme des périodes de stabilité et d'homogénéité, séparées par des périodes de transition au cours desquelles s'opère le changement vers la phase de stabilité suivante. C'est par ailleurs en prolongeant ce raisonnement que l'étude approfondie de certaines périodes de transition, en leur découvrant une forme d'homogénéité, d'unité, de stabilité, se retrouve contrainte de les faire passer au stade de « périodes à part entière »… gommant de ce fait l'idée de processus qu'elle introduisait.

En outre, la définition de périodes intermédiaires peut constituer un postulat conditionneur et extrêmement orienté, comme c'est le cas dans l'histoire égyptienne, où trois périodes « intermédiaires » (2200-2033 av. J.-C. ; 1710-1550 av. J.-C. ; 1069-664 av. J.-C.) de déclin sont comprises entre des époques dites « brillantes »[11].

Le temps construit sous forme de chronologies « classiques » nous amène donc à penser le passé de façon linéaire, saccadée par une succession de périodes marquées par des discontinuités rigides, dans une spatialité ambiguë.

2.1.4 Conclusions sur la périodisation : un paradoxe oscillant entre instant et durée

Il nous semble que les ambiguïtés et les difficultés relatives à la prise en compte du temps en histoire ou en archéologie pour les périodes les plus anciennes, soient inhérentes au fait que l'essence même de la période repose sur un paradoxe : celle-ci est en effet à la fois instant et durée. Durée, car la période est censée représenter une étape dans l'Histoire, individualisée par des critères jugés pertinents par les spécialistes (un niveau de technologie ou un règne par exemple) caractérisée par un début, une fin et donc une durée plus ou moins précises. Il est bien évident que le temps continue de s'écouler au sein de la période, que toutes sortes de changements s'opèrent, et que l'existence de celle-ci et donc de ses bornes ne sont relatives qu'aux critères techniques, politiques ou sociaux (et à leur intensité) qui ont permis de les identifier.

Mais bien que la période soit, par essence, durée, nous sommes fréquemment condamnés à l'aborder comme un instant, et nous ne pouvons traiter, pour aborder les dynamiques des systèmes de peuplement anciens, que des successions d' « arrêts sur image » certainement très peu

[11] Dictionnaire des Arts du Musée du Louvre, « Périodes intermédiaires », consulté le 11/09/2015, http://www.louvre.fr/definitions/periodes-intermediaires.

représentatifs de la réalité puisque des sites archéologiques appartenant à une même période de 400 ans ne sont pas forcément contemporains…

La période est aujourd'hui cependant la plus petite unité disponible pour appréhender le changement sur des périodes pré- ou proto-historiques, par essence indivisible : une reclassification ou une amélioration de la précision de la connaissance sur une période donnée s'accompagnant de sa division… en plusieurs autres périodes, certes moins longues, mais sujettes aux mêmes écueils que les précédentes.

2.2 Méthodes avancées de traitement de l'incertitude en chronologie

2.2.1 Les démarches probabilistes d'élaboration de la chronologie et de ses niveaux d'incertitude

Dans le domaine de la chronologie archéologique, les approches les plus performantes dans la construction de chronologies intégrant l'incertitude sont de nature probabiliste (Desachy, 2012). « Ces approches avancées se caractérisent formellement par un passage dans un univers mathématique continu : celui des nombres réels et non plus des simples valeurs entières (les probabilités prennent ainsi leurs valeurs dans l'intervalle continu de 0 à 1) ; et, en pratique, par le recours à un arsenal plus sophistiqué, qui peut être difficile à maîtriser pleinement pour un non-mathématicien. Il suppose en effet la mise en œuvre d'interprétations et d'hypothèses de nature non seulement archéologique, mais aussi spécifiquement mathématique et statistique » (Desachy, 2012).

Des solutions originales ont été proposées afin de s'attaquer aux problématiques évoquées précédemment : Crema et al. ont proposé de s'appuyer sur la théorie des possibilités : « the core concept behind this approach is that, rather than date an archaeological event e with absolute certainty of presence or absence at a particular time step, we can define a more flexible existence value w, that ranges somewhere between 0 (absolute certainty of non-existence) and 1 (absolute certainty of existence) in a temporal snapshot whose duration is defined by Δt. » (Crema et al., 2010). Diverses méthodes ont été proposées par les archéologues pour définir la valeur w (Crema et al., 2010). Parmi eux, Ian Johnson a quantifié cette imprécision en s'appuyant sur la démarche aoristique développée en criminologie par Ratcliffe (Ratcliffe, 2000; Johnson, 2004): «different events will have different time spans according to the quality of our temporal knowledge: larger time-spans will be created where there is high uncertainty and shorter time-spans with the uncertainty is lower» (Crema et al., 2010). L'essence de cette démarche est illustrée par la Figure 3.

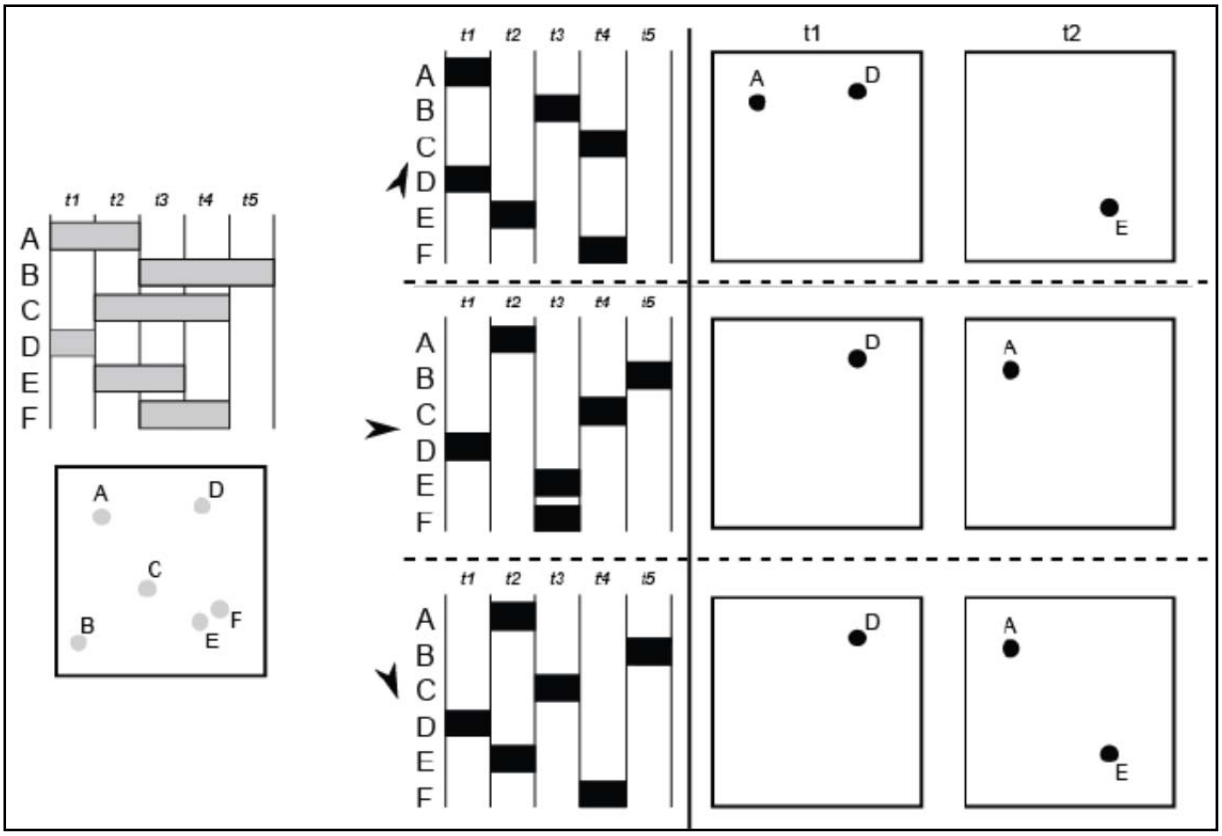


Figure 3 - L'incertitude temporelle dans les répartitions de points (Le carré à gauche représente une répartition hypothétique de points avec, au-dessus, notre degré de connaissance temporelle sur les six points (A-F) sur cinq « time blocks » (t1-t5). Les barres grises horizontales représentent l'étendue temporelle de chaque point, montrant que le point D a une faible incertitude (il appartient uniquement au time block t1) et le point B a une incertitude plus élevée (le point est temporellement situé quelque part entre les « time blocks » t3 et t5). Les trois encadrés au centre montrent trois schémas temporels possibles (au centre) et spatio-temporels (à droite, pour les time blocks t1 et t2) (Bevan et al., 2013)).

Dan Lawrence développa dans sa thèse une méthode dite des « time blocks », ayant pour objectif de s'affranchir des diverses résolutions temporelles des périodes construisant la chronologie d'une zone : « A variety of factors regarding the quality, quantity and general state of research across the region, as well as the nature of the archaeological record itself, has led to differences in the precision available for dating changes in the ceramic sequence. This means that for certain areas we can deal with far shorter periods of time than others, and therefore operate with a greater degree of precision in making interpretations» (Lawrence, 2012).

Afin de comparer des périodes (ou « phases ») de longueur différente, on revient donc à un système de datation sous forme d'intervalles de 100 ans (Tableau 4).

Tableau 4 - Exemple de successions et de longueurs de phases (d'après Lawrence, 2012)

Temps (années)	Phases de la prospection 1	Phases de la prospection 2	Phases de la prospection 3
0 - 100	A	E	G
100 - 200	B	E	G
200 - 300	C	F	G
300 - 400	D	F	G

Dans cette méthode, nous savons ainsi que si nous nous intéressons au peuplement décrit par la prospection 1 (Survey 1) phase A, nous devrons comparer celui-ci avec la phase E de la prospection 2, et la phase G de la prospection 3. La probabilité que le peuplement considéré dans les trois prospections ait existé en même temps est alors estimée par cette équation : Durée de la phase considérée / longueur de la phase englobant = probabilité d'occupation d'un site. Ainsi, si l'on se réfère au tableau précédent, la probabilité pour qu'un site archéologique identifié dans la prospection 2 phase E se retrouve dans la phase A est de : 100/200 = 0.5 = 50%.

L'approche bayésienne connaît quant à elle un succès croissant en archéologie, depuis ses premières utilisations ayant pour objectif de relier des datations d'objets archéologiques au radiocarbone aux dates de début et de fin de périodes significatives de la chronologie, en prenant en compte l'incertitude associée à la démarche (Naylor, Smith, 1988). Le succès de cette approche a cependant été très tôt basé sur la possibilité de combiner des sources de données diverses, qualitatives et quantitatives –séquences stratigraphiques, sources de datation historiques ou absolues- (Litton, Buck, 1996 ; Buck, 2004) et de connaissance dans des modèles complexes, et sur la capacité à intégrer les sources d'incertitude intervenant à la fois sur les données et sur les paramètres de la modélisation (Lanos, 2010). L'analyse bayésienne mobilise une notion de probabilité « subjective », donnée comme une valeur de confiance déterminée par l'analyste –par opposition aux probabilités « objectives » en référence aux lois du hasard, souvent mobilisées dans les travaux recourant au modèle de sériation et à l'analyse factorielle des correspondances (Desachy, 2012 ; Lanos, 2010). C'est le cas de la modélisation proposée par Philippe Lanos (2010 ; 2012), une des applications les plus récentes du paradigme bayésien à la chronologie. Ce développement répond à la multiplication des données de datation qu'il devient nécessaire de traiter par des méthodes efficaces et reproductibles, afin de construire des chronologies fiables, en quantifiant le mieux possible la succession des évènements dans le temps –en les calant sur l'échelle calendaire, et en estimant leur durée (Lanos, 2010). Ainsi, « les inférences et les

prédictions produites par cette modélisation s'expriment sous une forme probabiliste qui synthétise et résume nos connaissances sur l'ensemble des événements étudiés » (Lanos, 2010).

Cette approche probabiliste est également employée dans le domaine de l'archéologie dite « prédictive », qui consiste selon Whitley (2006), à comprendre les relations entre les sites et une série de variables indépendantes que l'on suppose à l'origine des choix conscients ou subconscients de localisation des artefacts ou de diverses caractéristiques des anciens habitants de la zone étudiée. Ainsi, selon Connolly et Lake (2006), « prediction is probabilistic. Very few, if any, models predict site occurrence with the absolute certainty of presence or absence. Consequently it usually makes sense to talk about the model correctly predicting site presence at some specified probability, p, between 0.0 and 1.0". Afin d'évaluer les probabilités de localisation de la variable étudiée, la méthode probabiliste la plus fréquemment employée par les archéologues est celle de l'analyse de régression : "To date, most predictive models have been constructed based on the logistic regression method. Those models are binary, and the final predictive output is a probability map showing a certain area's classification according to the probability (high, medium, low) of the existence of sites." (Hatzinikolaou, 2006).

2.2.2 Traitement de l'incertitude chronologique par la logique floue

Certains auteurs, notamment dans le domaine de l'archéologie prédictive, ont cependant souhaité passer du cadre probabiliste « classique » au cadre de la logique floue, plus nuancé que celui de la logique probabiliste : « archaeologists recognized the problematic related to the classification long time ago, and tried to remediate it, while remaining in the same Aristotelian philosophical/logical framework, by applying various statistical techniques, such as probabilistic, or Bayesian methods. (…) It has been demonstrated that by shifting our reasoning to a different logical framework, namely the so-called fuzzy logic, we are closer to better describing the archaeological reality» (Niccolucci, Hermon, 2015).

Selon Eugenia G. Hatzinikolaou (2006) « Fuzzy logic permits the notion of nuance: an element can be true to a degree and false to a degree, while an object can, to a degree, belong in more than one set». Celle-ci poursuit «fuzzy logic is a new perspective: it has the potential to specify a site's origin; it is realistic; and it uses the abilities of the human expertise in combination with a strong scientific theory» (Hatzinikolaou, 2006). Cette même auteure s'est ainsi servie de la logique floue dans le but de «prédire» la localisation de sites préhistoriques sur l'île de Melos en Grèce (Hatzinikolaou et al. 2003).

Franco Niccolucci et al. (2001) s'attellent quant à eux à des problématiques concernant la fiabilité des données statistiques dérivant de l'archéométrie, et proposent l'utilisation de la logique floue dans le but d'attribuer un coefficient de fiabilité à des attributs imprécis. Hermon et Niccolucci (2002, 2003) construisent également des typologies *floues* afin d'étudier les artefacts archéologiques comme des classes d'objets dont les limites ne sont pas définies avec exactitude. Ceux-ci rejettent en effet l'utilisation de la logique probabiliste : « a probabilistic approach leads to nowhere because of the normalization property of probability, which is the basis for the multiplicative law we were forced to adopt. In other words, probability is very unreliable as a measure of reliability" (Niccolucci, Hermon, 2004). La démarche de ces chercheurs est énoncée par Farinetti et al. (2004) : « Using fuzzy logic we would try to assess a better categorization of real data that better matches the actual reality of occupation, and the degree of occupation in the landscape for each period ».

Cyril de Runz (2008) a quant à lui expérimenté un traitement par la logique floue afin de positionner les objets archéologiques dans le temps en fonction d'une date en entrée, de calculer un indice d'antériorité, dont les valeurs donnent une indication de fiabilité de l'antériorité demandée, et une information graduée de l'antériorité des objets archéologiques.

Divers auteurs ayant mobilisé la logique floue dans des problématiques archéologiques sont en outre évoqués dans l'ouvrage de Juan A. Barceló (2009) qui en propose un état de l'art.

2.3 Durée des phénomènes ou précision des données?

Les méthodes probabilistes présentées précédemment offrent des perspectives très intéressantes en matière de quantification de l'incertitude temporelle attachée aux objets archéologiques, et à la constitution de chronologies. Cependant, il nous semble qu'elles se heurtent à d'importants écueils.

En effet, l'analyse aoristique et le système des « time blocks » traduisent le discours suivant : l'incertitude relative à la datation d'un évènement « ponctuel » dans le temps peut être mesurée par la longueur de la fourchette temporelle au cours de laquelle cet évènement a pu avoir lieu. Plus cette fourchette, ou le « time block » sont longs, plus l'incertitude relative à la date d'apparition de l'évènement est élevée.

Ces raisonnements semblent en fait confondre la précision de la datation et la durée d'un processus, ou la persistance dans le temps d'un mode d'occupation du sol, par exemple. La durée d'une période dans un modèle chronologique, est simultanément la manifestation de la durée

d'un processus historique et une résolution spatio-temporelle, à la fois origine (échelle à laquelle on a observé les phénomènes) et résultat (frise chronologique) de la recherche archéologique (de la perception du chercheur, d'un ensemble de techniques, d'hypothèses, et de moyens). Faire la part entre ce qui relève de la durée d'un phénomène dans le temps, et la taille d'une fourchette temporelle relatant notre méconnaissance des dates de début et de fin d'un phénomène à une certaine échelle, s'avère une entreprise extrêmement complexe, réclamant un niveau de connaissance que nous ne possédons bien souvent pas.

Le problème dit de la « contemporanéité » des phénomènes (dit « contemporaneity problem », Schact, 1984 ; ou encore « map overestimation » Ammerman, 1981 ; Plog, Hantman, 1990) est également issu de ces considérations : il consiste à considérer des sites archéologiques comme contemporains alors qu'ils ont été occupés successivement, mais au sein d'une même période archéologique (Schact, 1984 ; Lawrence, 2012). Ce problème, notamment créé par la datation à partir de typologies céramiques, peut donc fausser notre interprétation des rythmes de changement et des structures spatio-temporelles de l'espace étudié.

2.4 Incertitude ou question d'échelles ?

2.4.1 Résolution des données et échelles d'étude

Cette confusion entre durée et précision des phénomènes s'ajoute selon nous à une autre confusion tout aussi dangereuse, entre le niveau d'incertitude des données et leur résolution.

On préconise en effet désormais souvent en archéologie, notamment depuis la diffusion des SIG et de l'analyse spatiale, d' « appliquer une approche multiscalaire » afin de « limiter l'effet de la zone d'étude » et d' « effectuer des va et vient entre petites et grandes échelles pour affiner la lecture des phénomènes et leur évolution au cours du temps » (Pillot, Saligny, 2013), présentant ces apports méthodologiques comme des solutions pour remédier à l'incertitude.

On peut observer ainsi aujourd'hui fréquemment une tendance à zoomer et dézoomer à loisir sur des espaces caractérisés par des données dont la résolution n'est pas aussi élastique que la démarche qu'on prétend leur imposer. Des données spatio-temporelles à la résolution différente, et suggérant des échelles d'observation des phénomènes différentes en viennent à être comparées et mélangées, aboutissant à interprétations et des modèles spatio-temporels potentiellement erronés. La résolution des données est alors considérée comme une limite, comme un facteur d'incertitude, alors que c'est notre utilisation inappropriée de ces données et le choix d'échelles d'étude incompatibles avec leur niveau de précision qui introduit des biais. Si l'échelle d'étude est

« un filtre qui appauvrit la réalité mais qui préserve ce qui est pertinent par rapport à une intention donnée » (Racine et al., 1980), il est nécessaire que nos attentes et nos intentions soient adaptées à la réalité de notre base de données, afin de ne pas « reprocher » aux données ou mettre sous le nom d' « incertitude » ce que les données ne pourraient de toute façon pas nous dire. C'est le propos de Gervais et al. (2005) : « Parfaitement fiables pour un usage préalablement ciblé, les données peuvent devenir erronées, inadéquates ou totalement incompatibles pour un usage différent », cet usage étant à l'origine des échelles d'étude choisies par l'analyste. Xavier Rodier et Lahouari Kaddouri (2012) dénoncent quant à eux « les choix d'échelles spatiales et temporelles de modélisation, qui se traduisent par l'inadéquation de l'échelle des processus modélisés avec celle de l'observation de ces processus » -l'observation des processus s'effectuant, en archéologie comme en analyse spatiale, par l'intermédiaire des données collectées- selon eux générateurs d'incertitude.

2.4.2 Quand les modèles nient les échelles

À cette manipulation inappropriée des échelles d'étude peut également s'ajouter une tendance tout aussi problématique, consistant à nier la multiscalarité des phénomènes. Benoît Chevrier et Heloïse Koehler dénoncent ce « choix plus ou moins conscient d'une unique échelle spatio-temporelle d'analyse et d'interprétation, excluant de fait une grande partie de la complexité des phénomènes techniques et anthropiques. (...) Cette vision amène à figer l'homme et sa culture dans un espace et un temps donnés et la question de l'altérité se cantonne par conséquent à la simple comparaison d'entités différentes. Les dynamiques locales sont résumées à celles globales, ou inversement selon le cas » (Chevrier, Koehler, 2013).

Cela nous ramène à nos premières réflexions sur la création et l'utilisation de modèles de référence concernant les problématiques de l'évolution humaine relative aux grands changements environnementaux, empreints d'incertitude: « Les tentatives de corrélation des « grandes étapes évolutives » de l'homme avec de profonds changements climatiques à l'échelle du globe (Demenocal, 1995 ; Trauth et al., 2009) ou encore la théorie de l'East Side Story proposant notamment l'hypothèse déterministe d'un développement de la bipédie lié à des paysages et des climats particuliers (Coppens, 1983) en sont des exemples très clairs et illustrent parfaitement la confusion somme toute classique et récurrente des échelles en Préhistoire (Rasse 2009, 2010) ».

Cette critique de Michel Rasse fait écho aux études établissant des corrélations simplistes et prématurées entre choc climatique et crise sociétale au Proche-Orient, et où la manipulation peu rigoureuse des données et des échelles n'a pour but que de valider des hypothèses préconçues, et

d'alimenter une course au « scoop » archéologique. Finné et al. (2011) dénoncent cette manipulation erronée des échelles, qui n'a pour but que de démontrer ce qui nous arrange: « causes and effects are often based on climate data from one region and societal upheaval in another one ». On établit ainsi des corrélations entre choc climatique et effondrement d'une civilisation, par exemple, sans se questionner sur la portée de ces deux phénomènes. Arlene Miller Rosen (2007) ajoutera à cette remarque: « Archaeologists may be able to identify a hiatus resulting from a « crisis » of sorts at any one site, however, it is quite difficult to extrapolate from this to an entire region which is historically and geographically diverse ».

CONCLUSION : ENJEUX ET QUESTIONNEMENTS MAJEURS DANS L'ETUDE DES DYNAMIQUES SPATIO-TEMPORELLES DES SYSTEMES DE PEUPLEMENT PASSES.

Lahouari Kaddouri et Xavier Rodier affirmaient en 2013 que « l'incertitude, si elle est parfois qualifiée, n'est jamais quantifiée et n'est pas traitée pour elle-même. En règle générale, lorsqu'un degré d'incertitude – du type fiable, moyennement fiable, incertain – est attribué aux données, il n'est pas mobilisé dans le traitement des données et ne sert qu'à vérifier éventuellement la fiabilité d'une information, au mieux à effectuer les analyses sur des sélections selon ce critère ». Nous ne serons pas aussi catégoriques, notamment eu égard aux travaux des archéologues exploitant le domaine de la logique floue. Il faut cependant reconnaître que la quantification et l'intégration de cette dimension dans l'analyse des données à une échelle autre que celle du site, et dans la recherche des modes et des dynamiques de peuplement, est encore peu diffusée.

C'est pourtant certainement cette piste qu'il conviendrait d'explorer, notamment dans le but de s'affranchir des modèles chronologiques et interprétatifs dont la rigidité laisse peu de marge de manœuvre aux archéologues et de place à l'émergence, et ne font qu'accroître l'incertitude en emprisonnant les études dans ce carcan.

Il serait toutefois certainement contre-productif que la multitude des dimensions que recouvre l'incertitude, notamment en archéologie – alors que les tentatives de définition et de conceptualisation se multiplient sans jamais vraiment parvenir à un consensus – fasse passer celle-ci de « tabou » à un nouveau terme fourre-tout derrière lequel nous masquons l'inadéquation de nos objectifs et de nos méthodes au type de données dont nous disposons : l'incertitude n'est pas qu'inhérente aux données –aux modes de datation, à la variabilité de la prospection- mais aussi aux choix que l'on effectue à partir de ces données, et à l'interprétation que l'on en fait. Niccolucci et al. (2001) nous rappellent à ce sujet que "by choosing a technique, we must bear in mind that we are thus making a cognitive choice, which will reflect on data and results. Fuzzy theory continuously reminds us that during an investigation we make choices that are determinant to formalize data, but they leave no sign in the interpretative process, so that raw data and hypothetical or reconstructed information become inseparable: the more the formalism used for data analysis is hidden, as in computer applications and, in particular in database applications, the bigger the risk of overwhelming the original information content of data with the subjective meaning of interpretation".

De ces diverses expériences et considérations, on peut faire donc ressortir les questionnements et enjeux selon nous majeurs dans l'étude des dynamiques spatio-temporelles des systèmes de peuplement passés :

- Quelle attitude adopter face à l'hétérogénéité des données et des bases qu'elles constituent ?
- Quelle méthodologie adopter afin de tenter de percevoir les structures et les dynamiques spatio-temporelles des peuplements passés à partir de données n'ayant pas toutes la même qualité (spatiale, temporelle et thématique)?
- Quels types de résultats est-on *en droit* d'attendre et de produire à partir de ces données hétérogènes ?
- Quel cheminement intellectuel adopter dans un cadre aussi lâche et incertain ?

Chapitre 2 : « Faire science avec l'incertitude[12] » : pour une démarche flexible et exploratoire s'inspirant du cadre théorique et méthodologique de la géoprospective.

INTRODUCTION

Les thématiques abordées dans le chapitre précédent et les enjeux et questionnements qui en découlent, sont principalement une affaire d'espace, de temps, et d'incertitude. Ou bien faudrait-il dire d'incertitude spatio-temporelle ? D'espace-temps en contexte incertain ? Il semblerait en fait que bien plus que conjointes, ces trois dimensions soient fermement intriquées. Tenter de les saisir en les dissociant, même temporairement, ne peut ainsi sans doute que nous conduire à des démarches partielles, voire nous induire en erreur.

Si l'analyse spatiale a pour base théorique une prise en compte de l'espace comme un agent à part entière –certes dépourvu de finalité-, et non comme un simple support (Voiron-Canicio, 2006), nous postulons qu'une prise en compte efficace de l'incertitude ne doit pas maintenir celle-ci à distance uniquement sous forme de visualisation, ou n'intervenir qu'à un moment précis des études (généralement, soit en amont, soit en aval) sans que celle-ci n'ait de véritable répercussion sur les résultats. Il est pour nous fondamental de raisonner « dans » l'incertitude, en introduisant celle-ci au cœur des analyses, et ce tout au long des traitements.

En outre, Bernard Elissalde (2000) s'interrogeait : « Peut-on, en dehors de la tradition de la géographie rétrospective ou des tableaux géographiques successifs, trouver un axe de recherche permettant à la fois d'interpréter le fonctionnement des systèmes spatiaux anciens et futurs et de détecter, à travers les ruptures ou les modifications de structure, les indices d'un changement spatial dans le lieu étudié? ».

[12] Expression empruntée au projet « Faire science avec l'incertitude » initié en 2013, porté par la MSHS Sud Est en partenariat avec l'UMR 7264-CEPAM, l'UMR 7300-ESPACE et le GDR 3359-MODYS. http://sites.unice.fr/site/paduano/mshs/?p=902

Dans ce contexte, nous pensons qu'adapter et transférer le cadre théorique et méthodologique de la géoprospective peut s'avérer utile dans la recherche des structures et dynamiques spatio-temporelles des systèmes de peuplement passés. Nous souhaitons ici établir une passerelle entre les deux disciplines (archéologie et géographie au sens large et plus précisément, archéologie spatiale et géoprospective) en postulant que celles-ci peuvent se nourrir mutuellement. Ce chapitre développera donc en quoi les problématiques et les écueils rencontrés en géoprospective et les solutions théoriques et méthodologiques développées pour les résoudre peuvent se rapprocher et s'adapter aux problématiques d'archéologie auxquelles nous sommes confrontés.

1. PROJETER DANS LE PASSE LE CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE DE LA GEOPROSPECTIVE.

1.1 L'espace, au cœur de la démarche

Champ de recherche récent et encore assez peu connu (Voiron-Canicio, 2006 ; Emsellem et al., 2012), la géoprospective est une démarche de recherche en géographie appliquée à des problématiques de prospective environnementale ou de prospective territoriale (Gourmelon et al., 2012), visant à anticiper et modéliser les systèmes spatiaux et leurs devenirs possibles par une approche véritablement spatiale (Voiron-Canicio, 2006 ; Emsellem et al., 2012). Elle a pour objectif d' « anticiper l'évolution d'un système spatial en analysant sa capacité à réagir au changement, à s'adapter, céder, résister et changer le cours des processus spatiaux » (Emsellem et al., 2012). Cette perspective spatiale est ainsi directement liée à des hypothèses issues du champ théorique de l'analyse spatiale, désormais connu et de plus en plus adopté en archéologie en France depuis l'expérience Archaeomedes (Archaeomedes, 1998), donnant naissance à une nouvelle branche de l'archéologie appelée « archéologie spatiale » (Robert, 2012 ; Favory et al., 2012)

Nous nous inscrivons totalement dans ce champ théorique, considérant que « l'espace géographique ne se réduit pas à un simple support de localisation, c'est-à-dire à un environnement dans lequel se localisent les faits géographiques, mais il agit comme une contrainte et comme un paramètre explicatif de la transformation des territoires » (Gourmelon et al., 2012). Ainsi, notre démarche repose sur trois postulats de base empruntés à Christine Voiron-Canicio (2012) :

« 1) L'espace géographique, produit par la société, n'est pas seulement un support, c'est un agent à part entière, certes différent des agents socio-économiques car dépourvu de finalité et d'intentionnalité, mais qui ordonne l'action de ces derniers.

2) L'espace géographique possède la propriété d'être à la fois organisé et organisant. L'organisation spatiale exerce des contraintes sur les évolutions futures du système spatial.

3) Tout système spatial possède un héritage spatial qui exerce des contraintes sur les projets d'une société mais qui est aussi un potentiel que les agents socio-économiques réévaluent continuellement ».

1.2 Retracer le passé et anticiper l'avenir : des incertitudes à rapprocher ?

L'incertitude fait partie intégrante de la démarche géoprospective. En effet, « dans toute démarche prospective, l'incertitude renvoie à l'impossibilité de deviner le futur, à tout ce qui est difficilement appréhendé par l'esprit, ce qui ne relève pas de règles déterministes, ce qui intègre une part d'aléatoire » (Basse, 2010). On pourrait même prolonger ce raisonnement en affirmant que la géoprospective trouve toute sa raison d'être au cœur même de l'incertitude associée aux événements à venir et à leur évolution : cette discipline constitue une conséquence de la prise de conscience de nos sociétés contemporaines de leur vulnérabilité, des risques et de l'incertitude qui les guettent (Houet et Gourmelon, 2014)… Tout comme l'archéologie trouve sa raison d'être dans l'incertitude associée à notre ignorance du passé lointain, et dans la volonté de reconstruire des structures et des processus spatiaux révolus ! Cette incertitude fondamentale est reconnue et intégrée en géoprospective au cœur de ses analyses depuis ses débuts, en utilisant par exemple un paramètre stochastique dans les variables d'entrée de modélisation, afin de « réduire la contrainte de détermination du passé sur le futur » (Basse, 2010).

Ainsi, si les changements probables, attendus et prévisibles sont généralement les mieux appréhendés, leur recherche bénéficiant de « la connaissance provenant d'expériences passées, menées sur des terrains divers, et de règles spatiales validées par des analyses rétrospectives » (Voiron-Canicio, 2012), un des enjeux les plus cruciaux de la géoprospective consiste à anticiper le futur spatio-temporel dans toute son imprévisibilité, son incertitude et son instabilité. Ce qui requiert par exemple « d'agréger des informations fragmentaires, rares et dont la fiabilité est variable, de recourir aux représentations des acteurs, de synthétiser les opinions d'experts dont les dires peuvent être contradictoires » (Voiron-Canicio, 2012), d'élaborer « de nouveaux protocoles d'analyse spatiale intégrant des connaissances observées et perçues, de fiabilité variable, et combinant des informations multidimensionnelles et multiscalaires » (Voiron-Canicio, 2012), et par conséquent de faire preuve d'innovation et de créativité au niveau notamment des démarches, des méthodes et des outils (Godet, 1986 ; Houet, Gourmelon, 2014).

On peut rapprocher ces besoins de ceux que l'on observe aujourd'hui en archéologie en termes de nouveauté, afin de s'écarter – temporairement ou non – des schémas de raisonnement habituels, des carcans et des modèles et hypothèses consensuels, et d'aborder ces problématiques sous un angle différent. Le but n'est ainsi pas de réfuter ou critiquer tout ce qui a été réalisé auparavant, mais de mettre en lumière, par des méthodologies et des points de vue nouveaux, des aspects différents des structures et des dynamiques spatio-temporelles différents de ceux que l'on peut généralement s'attendre à trouver.

1.3 Des « futurs possibles » aux « passés possibles »

Denise Pumain, en se demandant si « la géographie saurait-elle inventer le futur ? » (1998), appela à « l'exploration d'une diversité des futurs possibles », c'est-à-dire à élaborer une théorie évolutive des entités spatiales permettant d'étudier « de façon nomothétique le changement des structures géographiques » en s'intéressant aux processus qui font « advenir et devenir l'espace géographique» tout en réfutant les rigidités réduisant le futur à un simple prolongement des tendances du présent (Pumain, 1998). C'est le propos de la géoprospective, qui a pour objectif de « prévoir les devenirs possibles d'un espace, les impacts spatiaux de processus globaux ou locaux, les conséquences spatiales d'options d'aménagement, et de produire des outils d'aide à la décision qui soient spatialisés » (Voiron-Canicio, 2012). Les résultats produits se déclinent ainsi sous forme de divers scénarios dont les paramètres varient en fonction des conditions initiales du modèle, ou de l'hypothèse que l'on souhaite tester ou présenter.

Pour ce faire, la géoprospective s'appuie sur une démarche rétrospective : « Le postulat qui sous-tend les démarches d'anticipation est que le futur est contenu dans le passé « le présent est gros de l'avenir, le futur se pourrait lire dans le passé… » (Leibniz, 1714) mais avec une certaine marge d'imprévisibilité attribuée généralement au hasard » (Voiron-Canicio, 2012). Il s'agit ainsi de détecter les grandes tendances d'évolution du système ayant une forte probabilité de se maintenir, mais également les signaux faibles pouvant être porteurs de changement, afin d'évaluer les trajectoires de l'espace parmi un ensemble d'états possibles. Ainsi, le rythme, la stabilité ou des bifurcations dans la trajectoire du système sont analysés de manière rétrospective afin de retracer une trajectoire passée, sur la base de laquelle on peut anticiper, imaginer une trajectoire future de développement d'un territoire. La notion de trajectoire mobilisée peut donc s'apparenter à celle décrite sur la Figure 4.

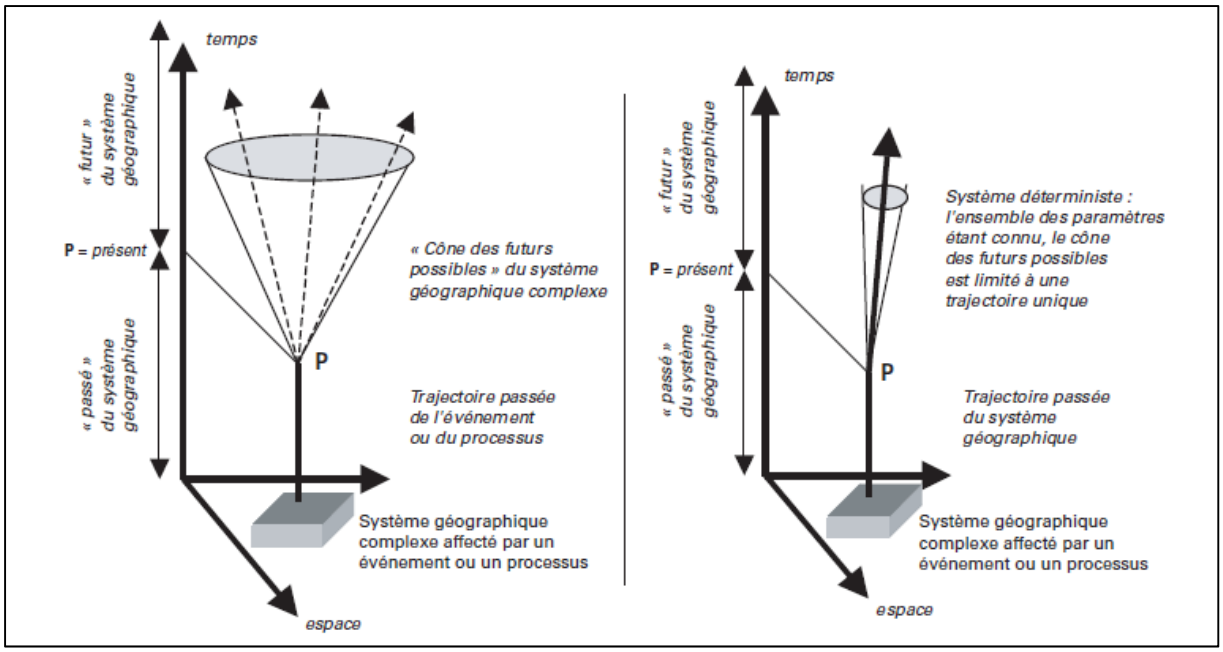


Figure 4 - Concepts de « cône des futurs possibles » du système géographique complexe (à gauche) et de trajectoire « limitée » du système géographique complexe (à droite) (Rolland-May, 2003)

On peut ici voir en quoi l'archéologie et la géoprospective peuvent s'enrichir mutuellement. Nous proposons de nous appuyer sur la définition de la « trajectoire d'un système géographique complexe » décrite par Christiane Rolland-May (2003) et sur l'expression de l'incertitude associée aux résultats des études de géoprospective, pour traduire les résultats des analyses spatio-temporelles en archéologie en divers scénarios des « passés possibles ». Ainsi, comme l'énonce Denise Pumain (1998), « On fait l'hypothèse que les objets géographiques, dans certains aspects au moins, représentent des réalisations particulières, parmi un univers de réalisations possibles, de processus dynamiques généraux ». Si la géoprospective se propose d'anticiper cet « univers de réalisations possibles », notre objectif est ici de retracer ces diverses possibilités dans le passé.

En outre, nous proposons de remettre en question l'optique limitée et linéaire de la « trajectoire passée » de l'événement ou du processus présenté sur la figure précédente, et de ne pas limiter la prise en compte de l'incertitude en géoprospective aux événements à venir, mais aussi dans sa phase de rétrospective. Ainsi, favoriser une prise en compte plus profonde et systématique de l'incertitude dans le passé permettrait de déployer un « cône des passés possibles » du système géographique, pouvant rétroagir sur les « futurs possibles » de la trajectoire. Nous raisonnons ici bien évidemment en termes de transferts possibles d'outils et de méthodes avec les adaptations que cela nécessite, la géoprospective ne s'appuyant pas sur des données archéologiques dans sa démarche rétrospective, mais s'inspirant d'époques bien plus contemporaines. Cet état d'esprit est

exprimé par Bevan et al. (2013): « Instead of ignoring this uncertainty and producing a single, but misleading, spatial analysis, we can generate different possible spatial patterns based on these temporal probabilities and then obtain a distribution of the more and less likely results ».

Nous souscrivons ainsi au cinquième principe énoncé par Arnaud Banos (2013) dans son Habilitation à Diriger des Recherches pour « libérer les pratiques de modélisation en géographie et en SHS » : « Les modèles de systèmes complexes se caractérisent par l'existence de solutions multiples, dont aucune n'est en général meilleure que les autres, si on s'en tient aux seuls principes ayant présidé à la construction du modèle. L'enjeu est alors d'identifier, par la simulation, un ensemble de solutions présentant une certaine optimalité par rapport aux objectifs définis ». Et si, selon Charles-Pierre Péguy, « il n'y a pas de système, pas de logique, pas de processus géographiques concevables qui n'incluent une dimension temporelle. Un avant ou des après » (1996), nous proposons d'adopter une logique impliquant plutôt *des* avant et *des* après.

2. AU CROISEMENT DE LA DIMENSION SPATIALE ET DE L'INCERTITUDE : UNE DEMARCHE EXPERIMENTALE ET EXPLORATOIRE

2.1 Rester ouvert à l'émergence : l'Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA)

On peut, à partir des considérations précédentes, affirmer qu' « il ne s'agit plus simplement de représenter le monde mais également de mieux faire émerger des phénomènes non directement visibles ou mal perçus et de mieux réfléchir aux structures spatiales qui s'y organisent » (Antoni et al., 2004).

La démarche exploratoire qui est au cœur de la géoprospective constitue selon nous une approche très appropriée aux questionnements archéologiques qui nous occupent, et peut constituer une réponse originale au fixisme des modèles, et au conditionnement des analyses par des hypothèses fortes et préconçues. Nous rejoignons en cela la philosophie de la Grounded Theory qui consiste à « rechercher des points de vue inédits par l'exploration de l'objet d'étude, sans postulat sous-tendant d'analyse ni idée préconçue mais en étant « à l'écoute» des données, dans une posture d'ouverture à l'émergence » (Strauss, Corbin, 1998 ; Glaser, 2012). Ainsi, l'analyste doit certes avoir un objectif lui permettant d'interpréter « les signes qui jalonnent son itinéraire », mais également être « ouvert à toute autre possibilité : obsédé par ce qu'il s'attend à trouver – et dont il ne peut avoir qu'une idée très vague, puisqu'il explore – il risque fort de passer à côté de merveilles qu'il n'attendait pas » (Banos, 2001). La démarche exploratoire renvoie ainsi à la « capacité du scientifique à se mettre en position d'étonnement, à se laisser guider par la

recherche de l'inattendu et plus généralement à laisser libre cours à sa créativité » (Banos, 2013), et ainsi, selon Marcel Roncayolo, à « réussir » à ne pas savoir ce qu'il cherche ! » (Roncayolo, Chesneau, 2011).

Cette démarche favorise l'esprit de l'expérimentation, que Daniel S. Milo (1992) définit comme le fait de « laisser une grande liberté à l'*arbitraire* du chercheur –et que les résultats tranchent. Un état d'esprit expérimental signifie qu'on « ne se laisse pas intimider » par la réalité étudiée, qu'on ne cherche pas à tout prix à motiver réalistiquement les questions qu'on lui pose ».

Nous nous inscrivons ainsi dans la philosophie et les techniques de l'Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) (Anselin, 1994), définie par Luc Anselin (1999) comme : « the collection of techniques to describe and visualise spatial distributions, identify atypical locations (spatial outliers), discover patterns of spatial association (spatial clusters), and suggest different spatial regimes and other forms of spatial instability or spatial non-stationarity ». Dans le même article, l'auteur propose un large état de l'art concernant les applications de l'Exploratory Data Analysis (EDA) et de l'ESDA. Ce champ de recherche est particulièrement intéressant dans la manipulation de bases de données archéologiques en ce qu'il aide à prendre en compte et à modéliser la complexité, notamment si la réalité que l'on interroge est décrite par un grand nombre de données (Antoni et al., 2004). L'EDA et l'ESDA sont ainsi « une démarche, voire une philosophie, d'analyse des données qui utilise de nombreuses techniques (dont la plupart sont graphiques) de manière à maximiser la prise en compte de ces données, découvrir leur structure sous-jacente, extraire les variables importantes, mettre en lumière leurs anomalies, tester des hypothèses, etc. » (Antoni et al., 2004).

2.2 Tirer parti de la diversité, plutôt que niveler par le bas

Daniel S. Milo (1991) évoque une attitude classique vis-à-vis des données –dans son cas, temporelles-, consistant à leur imposer de « rentrer dans le moule », faute de quoi on les élimine purement et simplement des analyses : « Simple outil de travail, la période finit par nous être extrêmement précieuse- car elle produit de la cohérence. Trop. Ses usagers (…) sont constamment confrontés aux trop nombreuses données qui échappent à la cohérence de la tranche de temps par eux isolée. Pour la sauver, on utilise toute une gamme de techniques qui ont pour but soit d'intégrer ces brebis égarées coûte que coûte, soit carrément de les éliminer ».

Faire parler les données permet à la fois de leur redonner tout leur sens et leur substance, et de s'intéresser à toutes leurs dimensions (notamment en termes de précision et de fiabilité) mais aussi de prendre toute la distance nécessaire vis-à-vis des structures qu'elles expriment et que l'on

détecte, en étant attentif non seulement aux grandes structures, que l'on s'attendait (ou non) à trouver, mais également aux signaux faibles, aux structures et aux changements « inattendus, extraordinaires, voire contreintuitifs, au regard des valeurs des variables modélisées – accélération-ralentissement d'une dynamique – ou de la morphologie spatiale – apparition-disparition d'une structure » (Voiron-Canicio, 2012). Cela suppose en amont de ne pas tenter de lisser ou d'homogénéiser à outrance les données, mais d'intégrer toute leur diversité dans les analyses. Cet état d'esprit peut se rapprocher de ce qu'Edgar Morin (1986) et Claude Lévi-Strauss (1962) appellent le « bricolage » et dont ils soulignent l'importance, consistant, selon ce dernier, à « élaborer des ensembles structurés, non pas directement avec d'autres ensembles structurés, mais en utilisant des résidus et des débris d'événements […], témoins fossiles de l'histoire d'un individu ou d'une société ».

Cette attitude implique également de conserver toute la donnée disponible, et de s'affranchir de la logique binaire d'une conservation de la donnée estimée comme « fiable », et de l'élimination de la donnée « non fiable », que l'on estime contre-productive : en plus de nous faire perdre de la donnée, celle-ci pourrait pousser l'analyste à surestimer la qualité et la certitude de ses données considérées comme fiables, et à se penser à l'abri d'une estimation de l'incertitude de ses analyses. Nous pensons qu'attribuer des poids différents à ses données reflétant la qualité de celles-ci, et les intégrer directement dans les analyses et les modèles, serait une option bien plus pertinente et porteuse.

2.3 « Déconstruire les représentations que véhiculent les catégories » (Roncayolo, Chesneau, 2011) pour une étude du changement spatial.

Nous avons vu dans le premier chapitre qu'une source majeure d'incertitude mais aussi de conditionnement des études en archéologie résidait dans la manipulation des échelles spatio-temporelles.

Dans le cadre d'une analyse exploratoire, il convient de préciser que le choix des échelles n'est pas anodin : il « suppose l'existence d'un point de vue, d'une intention et d'autre part, d'un référent. (…) Il est donc par définition, hypothèse » (Roncayolo, Chesneau, 2011). En outre, le même auteur suggère une distinction entre échelles d'analyse et niveaux d'organisation du territoire, des « rigidités qui relèvent en partie du droit », qui « figent plus ou moins la réalité », et sont une « construction acquise, d'origine sociale et historique » (Roncayolo, Chesneau, 2011). Cette discussion sur les échelles spatiales rejoint en quelque sorte celle sur la périodisation en histoire et en archéologie (cf. chapitre 1). Bien que les structures spatiales des sociétés étudiées ne relèvent

pas des niveaux d'organisation administratifs tels qu'on les expérimente aujourd'hui, il convient de garder à l'esprit que l'expérience de terrain menée par les missions archéologiques ayant recueilli les données, en dépend quant à elle fortement. Ainsi, celles-ci peuvent agir comme un paramètre explicatif de la répartition des données, et donc des structures spatio-temporelles détectées.

Ainsi, Marcel Roncayolo nous avertit : « Si vous vous cantonnez dans des échelles habituelles ou des niveaux définis institutionnellement, vous risquez de prédéterminer votre étude, de passer à côté de véritables problèmes » (Roncayolo, Chesneau, 2011). Celui-ci préconise, par le zoom et la perspective, qui favorisent la découverte de par leur nature heuristique, de « circuler entre les échelles et pouvoir choisir, tout bien considéré, non pas les représentations habituées, mais celles qui permettent de répondre à la thématique ou même de la corriger ou de l'inspirer » (Roncayolo, Chesneau, 2011). Ce serait donc en déconstruisant les échelles et les catégories habituelles, que l'on construit l'objet d'étude.

Car les catégories auxquelles nous sommes confrontés ne relèvent pas que d'une analyse à un temps t (ou à une succession de temps t). Il s'agit de comprendre la musicalité, c'est-à-dire les rythmes, les « tempos », des systèmes spatio-temporels : « À ces rythmes intégrés aux phénomènes ou aux usages sont associées des périodicités variées, entrecoupées de rupture, que l'on ne peut observer toutes à la même échelle. Autrement dit, la complexité (…) dérive de temporalités fort différentes, le rythme fait partie des choses, il n'est pas un découpage historique que l'on impose : il faut bien se résoudre à abandonner dans la chronologie – un simulacre de cohérence –, qui octroie le même rythme à toute chose». Ainsi, « Il convient plutôt d'étudier les phénomènes, sur le plan temporel, à des échelles correspondant à leur nature. Simultanéité et synchronie ne vont pas nécessairement de pair » (Roncayolo, Chesneau, 2011).

On comprend que les catégories spatiales et temporelles, aussi bien que les échelles, sont en général postulées (explicitement ou implicitement) et posées comme des *moyens pour* tenter de comprendre l'organisation et l'évolution d'un système de peuplement passé, et donc des préalables à l'analyse spatiale. Nous proposons d'adopter la démarche inverse, et postulons que c'est *par* l'exploration et l'expérimentation des structures spatiales à l'aide de méthodes flexibles et exploratoires d'analyse spatiale, que les échelles auxquelles s'expriment les phénomènes spatio-temporels peuvent être détectées. Loin de n'être qu'une démarche de vérification, l'analyse spatiale exploratoire relève d'un véritable cheminement de découverte. La datation, l'analyse spatiale et la production de chronologie doivent, pour nous, s'inscrire dans une dialectique, où pas à pas, chacune enrichit et permet d'ajuster l'autre. Nous partageons donc le point de vue de

Bernard Elissalde (2000): « En opposition avec la conception linéaire et cumulative du temps dans la géographie classique, l'approche par l'analyse spatiale et les systèmes spatiaux propose de prendre en compte les temporalités multiples et discontinues qui animent l'espace géographique. Ce sont les durées variables des structures spatiales, les événements spatiaux, les phases de transition territoriale et les phénomènes de résilience qui contribuent au changement spatial ». Nous retrouvons en cela l'état d'esprit propre à la Grounded Theory: « The rule is to let these areas emerge. Discover them. The researcher cannot preconceive what he will discover by staying open to the emergent » (Glaser, 2012).

Diverses méthodes et techniques sont pertinentes et suffisamment flexibles pour mener à bien cette démarche exploratoire en respectant les deux règles énoncées, et peuvent - doivent - être combinées, testées, comparées, afin de multiplier les points de vue et révéler des aspects divers des structures spatiales détectées, et les remettre en question.

2.4 Un chaînage de méthodes et de techniques

« When researching the future, no one method is appropriate in isolation » affirme Eddie Blass (2003). La démarche exploratoire, notamment très employée en géoprospective, requiert et permet par sa flexibilité « le chaînage des étapes et des méthodes, où chacune nourrit la suivante, et une prise en compte de l'espace à toutes les phases de la démarche (diagnostic, modélisation, simulation, et présentation des résultats) » (Emsellem et al., 2012). Nous postulons que la recherche du passé peut s'enrichir de ce contexte scientifique de liberté dans les méthodes, les points de vue, et que c'est en « décomplexant » les approches (Banos, 2013) que l'expérimentation, la créativité, et donc, l'innovation, peuvent véritablement s'exprimer.

L'analyse spatiale réalisée dans une démarche exploratoire est sous-tendue par deux règles de base: « ce qui compte n'est pas tant le changement observé en un lieu que la manière dont il diffère des changements observés sur les lieux voisins ; ce n'est pas l'événement qui importe mais la manière dont le système spatial réagit ou est susceptible de réagir à cet événement » (Voiron-Canicio, 2012).

Diverses méthodes –s'appuyant sur des socles théoriques variés- répondant à ce besoin de flexibilité et à ces règles seront sollicitées dans cette thèse, dont l'analyse d'images par morphologie mathématique, les géostatistiques et les statistiques spatiales, et les mathématiques associées à la théorie des possibilités et à la logique floue.

2.4.1 Les géostatistiques et les statistiques spatiales: une prise en compte de la singularité et de la discontinuité

Alors que les statistiques sont employées depuis fort longtemps en archéologie pour analyser les distributions de phénomènes et d'objets, nous pensons cette approche peu pertinente pour la détection des structures spatiales, dans la mesure où elle repose sur le postulat de base d'indépendance (Dauphiné, Voiron-Canicio, 1988). En effet, afin de prendre en compte la variation spatio-temporelle des phénomènes passés matérialisés par les données archéologiques, il est nécessaire d'employer un ensemble d'outils prenant en compte la non-indépendance spatio-temporelle des données géographiques et archéologiques, dont les géostatistiques fondées sur la théorie des variables régionalisées (Matheron, 1965)–et la morphologie mathématique- font partie. La Théorie des variables régionalisées, fondée par G. Matheron en 1965, propose une démarche d'analyse dédiée aux phénomènes qui varient à travers l'espace de manière partiellement structurée, partiellement chaotique ; « une variable régionalisée est une fonction de l'espace dont la valeur varie d'un lieu à un autre avec une certaine apparence de continuité sans qu'il soit en général possible d'en représenter la variation par une loi extrapolable » (Matheron, 1965).

En outre, les singularités et les discontinuités que l'on recherche se manifestent concrètement dans les données par « un changement notable de valeur par rapport aux valeurs du voisinage. Or, cette démarcation vis-à-vis du voisinage, qui se mesure à partir d'écarts et de gradients, dépend grandement des méthodes et des techniques utilisées pour analyser les variations d'un phénomène à travers le temps et l'espace » (Voiron-Canicio, 2012). Alors que les statistiques classiques considèrent l'irrégularité spatio-temporelle comme du bruit, au profit du calcul de la tendance (Voiron-Canicio, 2012) les géostatistiques « considèrent que les irrégularités spatiales ne sont pas du bruit mais des caractéristiques du phénomène, ayant leur propre structure à une certaine échelle, et que derrière les fluctuations d'apparence aléatoire existe une structure qui peut être la tendance ou tout autre chose (Dauphiné, Voiron-Canicio, 1988) » (Voiron-Canicio, 2012). Les méthodes de géostatistique s'inscrivent pleinement dans l'ESDA (Anselin, 1999).

Peu d'application des géostatistiques ont été réalisées en archéologie. D'après Lloyd et Atkinson (2004), le krigeage est la méthode la plus exploitée, notamment dans le domaine de l'archéologie prédictive. Markovsky et Bevan (2011) ont quant à eux appliqué ces méthodes pour la recherche de l'autocorrélation spatiale directionnelle dans les distributions de surface des artefacts archéologiques. Dans le domaine de la géographie, ces méthodes ont été mobilisées pour caractériser la dépendance spatiale dans le domaine de l'exploitation des minerais (Samal et al.,

2011) ou encore pour définir et prédire le phénomène de diffusion urbaine (Dauphiné, Voiron-Canicio, 1988 ; Lajoie, Mathian, 1989).

Les méthodes de géostatistique permettent à l'analyste de révéler la distribution spatiale d'un phénomène. La variographie, qui s'inscrit dans cet ensemble de méthodes, sera employée pour son aptitude à décrire la structure moyenne des phénomènes étudiés, leur déploiement et leur co-variation à travers l'espace. Celle-ci s'avère être un puissant outil de détection des structures spatiales, c'est-à-dire des relations invisibles qui existent entre les éléments spatiaux visibles, et de description de « tous les phénomènes qui varient à travers l'espace, de manière partiellement chaotique, partiellement structurée » (Dauphiné, Voiron-Canicio, 1988). Le variogramme « permet de savoir dans quelle mesure ce qui se passe en un point ressemble ou non, en moyenne, à ce qui se passe dans son entourage distant de h ; il mathématise la notion d'influence d'un échantillon : si l'influence d'un point sur son voisinage décroît très rapidement quand on s'éloigne de ce point, la croissance du variogramme à l'origine est très rapide » (Guillaume, 1977).

La variographie sera également privilégiée pour son aptitude à détecter les emboîtements de structures, et donc par extension, les différentes échelles auxquelles s'expriment les phénomènes spatiaux : « Les tailles de structures existant en moyenne dans le champ d'étude sont décelées par le variogramme et rangées de la plus petite à la plus grande. Calculé à des dates différentes, le variogramme multidimensionnel indique comment les structures spatiales ont évolué au cours du temps, s'il y a eu accentuation ou atténuation des contrastes locaux et, si c'est le cas, à quelle date, avec quelle intensité et dans quelle direction » (Voiron-Canicio, 1992).

Mais la géostatistique ne constitue pas une fin en soi : afin d'être pertinente, celle-ci doit être intégrée à une chaîne de traitements mobilisant divers outils, et permettant de mettre en évidence divers aspects de l'espace analysé.

2.4.2 Aborder les phénomènes par la forme : l'analyse d'images par morphologie mathématique

« Si le milieu quel qu'il soit est anisotrope, cela signifie qu'il est peuplé de limites, de discontinuités dont certaines peuvent souligner la cohérence de formes. L'intelligence de l'espace c'est donc aussi une connaissance des morphologies développées sur ou dans cet espace » (Martin, 2004). Une des entrées de notre démarche d'analyse spatiale exploratoire sera donc celle de la forme, afin d'identifier les continuités et discontinuités spatio-temporelles passées. Notre perception des formes et de leur dynamique suit celle énoncée par Sandrine Robert (2003) : « la

transmission des formes ne doit plus être appréhendée comme une transmission linéaire dans le temps et dans l'espace mais comme le résultat de processus mettant en œuvre différentes échelles et différents réseaux. La transmission des formes ne s'explique plus par la fixation, une fois pour toutes, d'un élément matériel, mais par son incessant renouvellement au sein d'un jeu complexe de réinterprétations ». L'enjeu consiste donc à détecter et faire varier diverses échelles afin de percevoir les formes et leurs dynamiques spatio-temporelles, et tenter d'identifier la nature des processus – c'est-à-dire les forces - sous-jacents qui les génèrent (Voiron-Canicio, 2012).

Ainsi, un des chemins d'étude que l'on peut emprunter consiste à partir du visible - la forme- pour aborder l'invisible, le caché. Cette opportunité nous est offerte par l'analyse d'images par morphologie mathématique.

La morphologie mathématique fut créée au cours des années 1960 à l'Ecole des Mines de Paris à Fontainebleau par Georges Matheron (Matheron, 1967) et Jean Serra (Serra, 1982). Cette méthode d'analyse d'images binaires ou en niveaux de gris, à la fois théorie et boîte à outils (Voiron-Canicio, 2009), considère celles-ci comme un ensemble de pixels. La morphologie mathématique va ainsi rechercher l'information géographique dans l'arrangement des pixels entre eux par l'intermédiaire d'un élément structurant ou sonde dont la taille détermine l'étendue du voisinage, afin de percevoir les formes et les structures de l'image les plus significatives, et « rattacher une forme visible à des propriétés générales, ou aux processus qui lui ont donné naissance » (Voiron-Canicio, 1995). Ainsi, l'image par elle-même n'exprime aucune structure, mais la structure découle des relations des différents points entre eux ; en effet, la valeur du pixel en lui-même a moins d'importance que les relations qu'il entretient avec son voisinage (Voiron-Canicio, 2009). C'est le chercheur qui, par le choix de l'élément structurant et des différentes opérations à effectuer sur l'image, va informer celle-ci et révéler un aspect structurel de l'image, et des structures invisibles (Haralick et al., 1987).

2.4.3 Spécificités et avantages d'une utilisation conjointe des géostatistiques et de la morphologie mathématique en archéologie

Ces deux méthodes sont ainsi complémentaires, car la première nous permet d'obtenir une représentation moyenne et synthétique d'un phénomène, et la seconde nous donne des indications sur la forme des structures à travers l'espace, et un sens dans leur répartition spatiale.

Celles-ci présentent l'avantage d'être remarquablement puissantes dans la détection des structures spatiales, mais également extrêmement flexibles : elles peuvent en effet être abordées dans une

optique totalement exploratoire, en permettant d'informer l'espace sans aucun *a priori* thématique, ni modèle, ni hypothèse préalable. Il n'est donc pas ici nécessaire de postuler quoi que ce soit en amont de l'analyse ; par ces méthodes, nous ne faisons qu'informer l'image (et donc l'espace), qui peut alors nous révéler par elle-même ses structures les plus significatives, qu'il nous appartient, bien entendu, d'interpréter au fur et à mesure que les résultats nous le permettent.

En outre, appliquées à l'archéologie, ces méthodes présentent l'avantage d'ouvrir considérablement les possibilités en termes de données et d'alléger les procédures de saisie : elles permettent d'analyser n'importe quel phénomène représenté par une grille de données spatialisées, pouvant être construites à partir d'une base de données quantitative ou même à partir d'une carte (Voiron-Canicio, 1995). Elles permettent ainsi de simplifier et d'organiser une base de données riche et complexe, et de prendre en compte une information à la fois quantitative et qualitative -propriétés récurrentes dans les bases de données archéologiques (De Runz et al., 2007)- à partir d'une image ou d'une grille de points, sans perdre aucune information dans la procédure. L'intérêt d'une démarche exploratoire spatio-morphologique combinant géostatistiques et morphologie mathématique, pour résoudre une problématique archéologique a en outre fait l'objet d'un article (Fusco, 2015).

La reproductibilité du protocole méthodologique est ainsi inhérente au mode opératoire : la démarche envisagée n'est en effet qu'un point de vue sur l'espace, qui peut être appliqué à tous types de problématique, d'échelles, de civilisations. Nous n'effectuons en effet aucun choix en amont des analyses, mais laissons parler l'espace par lui-même, et nous révéler les angles de vue par lesquels il est possible de l'aborder.

2.4.4 La théorie des possibilités et les ensembles flous

La théorie des ensembles flous est selon Zadeh (1965), un pas vers le rapprochement entre le formalisme et la précision des mathématiques, et la subtile imprécision du réel. Elle permet en fait de réconcilier la constitution de classes dont la pensée humaine a besoin pour aborder les phénomènes, et la réalité, dont la complexité la rend hermétique à toute réclusion au sein de classes trop rigides et figées. En d'autres termes, la logique floue est une alternative à la logique Booléenne, qui tente d'accommoder la définition d'ensembles et le concept de vague (« *vagueness* ») inhérent au réel et surtout, à notre propre perception du réel (Fisher, 2005 ; Fisher et al., 2006).

La théorie des possibilités, qui s'appuie sur les ensembles flous, offre un cadre formel adapté à des informations pauvres reflétant une ignorance partielle, et est, selon Zadeh (1978), bien plus adaptée que la théorie des probabilités à la prise en compte et à la modélisation des décisions humaines qui sont possibilistes par nature. Cette théorie, et les méthodes qui y sont associées permettent d'allier des connaissances précises, imprécises et incertaines, d'associer des données qualitatives et quantitatives, d'agréger des données multi-sources (bases de données différentes, sources hétérogènes, dires d'expert, avis discordants…). Nous pensons que ce cadre théorique et méthodologique est fort approprié aux problématiques archéologiques, car il permet d'aborder les phénomènes sous forme de *possibles,* c'est-à-dire un cadre dans lequel l'incertitude est une propriété inhérente et quantifiée aux phénomènes modélisés grâce aux mathématiques floues que cette théorie mobilise. L'incertitude permet au final de faire progresser la connaissance et l'exploration bien plus qu'elle ne les bride.

Le cadre des *espaces flous*, très développé par Christiane Rolland-May (1984, 1987), propose quant à lui une application spatiale de la théorie des ensembles flous dans laquelle on distingue « les notions d'espaces imprécis dont on peut quantifier l'imprécision, et d'espaces incertains dont on peut quantifier l'incertitude » (Rolland-May, 1987). Ce cadre sera également repris dans une optique de régionalisation *floue* du peuplement et de ses dynamiques spatio-temporelles.

CONCLUSION : POSITIONNEMENT DE LA RECHERCHE

« Nous ne devons pas confondre fonctionnement d'un phénomène et compréhension de ce phénomène ». Ce rappel à l'humilité de Patrice Langlois (2010) constitue la ligne directrice de cette thèse, dont l'objectif consiste à formaliser les divers niveaux spatiaux, temporels et d'incertitude inhérents à une base de données archéologiques, et à en extraire les « possibles » en matière de compréhension des formes et des modes d'occupation du sol et de leurs dynamiques spatio-temporelles.

Notre raisonnement prend ainsi appui, tout au long de cette recherche, sur la philosophie et les méthodes aujourd'hui rassemblées sous l'appellation des « théories de la complexité » (notamment développées sous l'angle de la géographie par Dauphiné, 2003 et Pumain, 2003), concept défini par Edgar Morin (1974) comme le domaine « de la diversité organisée, de l'organisation de la diversité ».

La complexité ici recherchée ne sera pas amenée par l'intégration d'une multitude de paramètres thématiques dans la compréhension des modes d'occupation du sol, mais par le développement

d'une chaîne de raisonnement exploratoire allant de la description d'une base de données archéologique, des biais et des incertitudes qu'elle comporte et des niveaux spatio-temporels qu'elle met en exergue, jusqu'à la modélisation d'une partie des phénomènes qu'elle renseigne selon ces divers niveaux spatio-temporels et d'incertitude. La complexité est donc ici relative à la diversité d'échelle spatiale et temporelle, des niveaux d'organisation et de l'incertitude liée à la fois aux données et à notre propre démarche modélisatrice. La Figure 5 synthétise notre démarche, et issue des considérations de ces deux premiers chapitres.

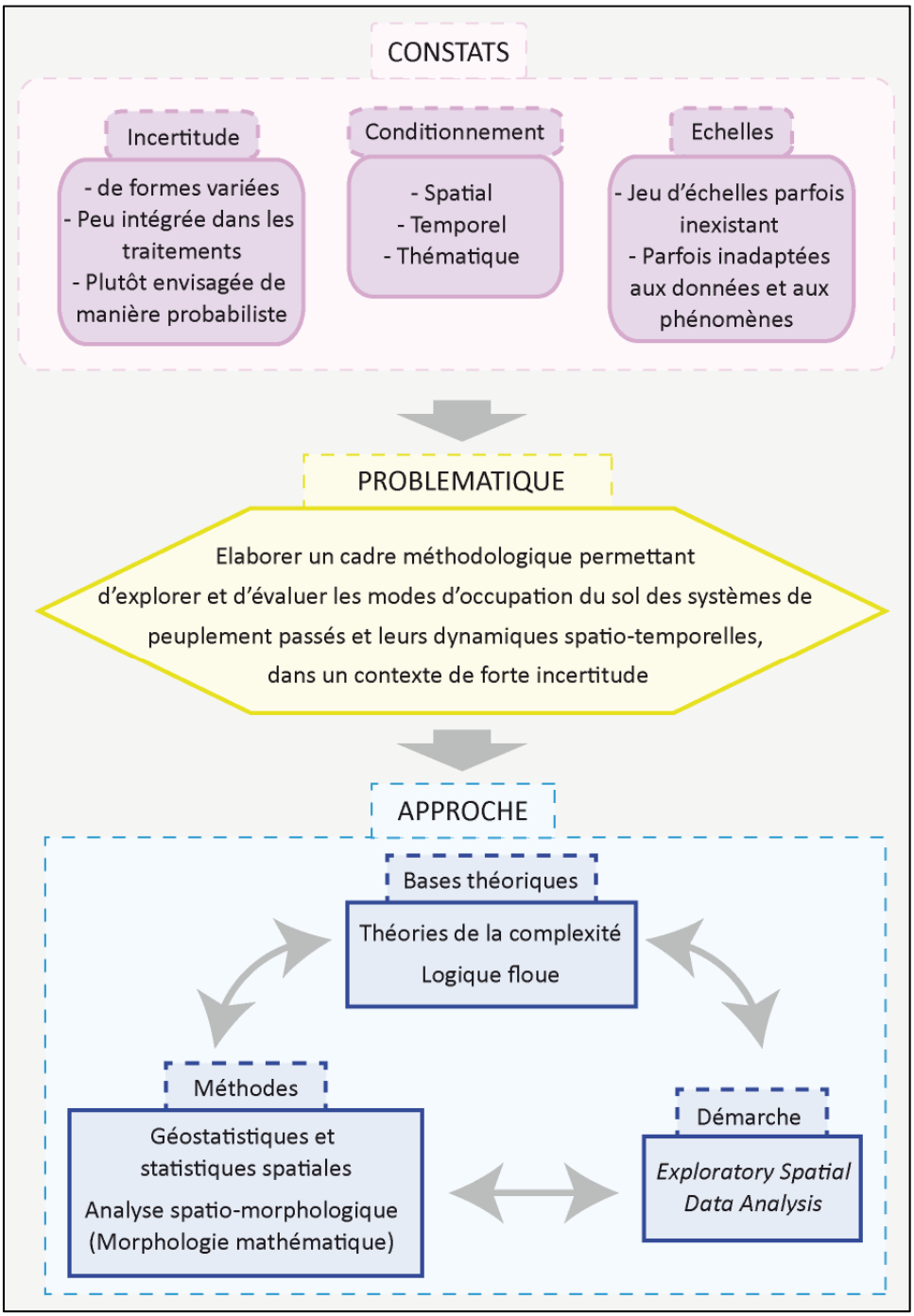


Figure 5 – Démarche adoptée dans cette thèse

Chapitre 3 : Contexte de la recherche

INTRODUCTION

Bien que menée dans une optique avant tout méthodologique, cette recherche répond à une demande formulée dans le cadre de l'ANR PaléoSyr, ayant pour objectif la caractérisation de la relation Homme-Milieu et de l'occupation du sol en Syrie occidentale –élément encore méconnu en tant que sous-ensemble cohérent dans le Croissant Fertile- au cours de l'Holocène.

Ce chapitre a ainsi pour objectif -outre la présentation du programme de recherche et de sa base de données- de prolonger les deux chapitres précédents : il s'agit de montrer en quoi les problématiques rencontrées par les chercheurs du programme PaléoSyr s'insèrent dans les questionnements archéologiques –et géographiques- actuels sur l'étude des dynamiques spatio-temporelles des systèmes de peuplement passés et sur l'incertitude inhérente à la démarche (chapitre 1), tout en donnant une dimension concrète et opérationnelle aux considérations d'ordre méthodologique qui constituent notre approche (chapitre 2).

1. PRESENTATION ET OBJECTIFS GENERAUX DU PROGRAMME PALEOSYR

1.1 Objectifs du programme

Le programme PaléoSyr a pour objectif principal d'étudier la coévolution homme–milieu dans le contexte bioclimatique et humain méditerranéen proche-oriental, plus spécifiquement à l'ouest du croissant fertile, à l'Holocène. Ce but se décline en divers sous-objectifs :

- Apprécier, à l'échelle régionale, les divers contextes environnementaux qui ont été le théâtre le plus précoce de toutes les grandes révolutions de l'humanité (néolithisation, urbanisation, étatisation) ;
- Identifier l'impact sur le milieu des aménagements humains, notamment les réponses apportées à la contrainte des variations climatiques, en dépassant les interprétations déterministes et mécanistes qui recherchent de manière binaire « action/réaction » des relations directes de causes à effets, pour les envisager dans le cadre de systèmes en coévolution qu'il faut modéliser ;

- Modéliser les systèmes « socio-climatiques « pour des périodes de crise environnementale ou d'oscillations rapides, ou de conditions environnementales constantes sur de longues durées ;
- Identifier et estimer la convergence chronologique entre les changements de deux séries temporelles et proposer des scénarios descriptifs et interprétatifs ;
- Estimer l'occupation du sol par l'homme en compilant l'information archéologique dans le Levant, en croisant vestiges datés d'habitat, et d'aménagements du paysage ;
- Modéliser des situations de changement provoquées par les conséquences de l'impact humain, et caractériser les ruptures d'équilibres ;
- Identifier des périodes de temps ou des aires géographiques pour lesquelles le nombre de données est suffisant en quantité et en qualité pour construire des modèles d'occupation du sol et identifier leur évolution dans le temps ;
- Mettre en relation ces données d'une région à l'autre et reconstruire un cadre géo-historique pertinent.

Il est intéressant de constater que les objectifs de ce programme embrassent à la fois une dimension purement archéologique, ou géo-archéologique, et des questionnements relatifs aux données produites et utilisées. Un lien explicite est ici établi entre qualité et nombre de données, et les résultats et interprétations issus de leur traitement, questionnant ainsi notre marge de manœuvre face à ces données et aux informations et aux modèles spatio-temporels d'occupation du sol que l'on souhaite en tirer. C'est sur ce point en particulier que s'est effectuée la rencontre entre la réflexion et les objectifs méthodologiques de cette thèse, et la demande du programme PaléoSyr.

1.2 Les zones géographiques étudiées dans le programme PaléoSyr

L'étude de cinq zones « test » permet de caractériser :

- L'espace littoral, directement ouvert aux influences tempérantes de la Méditerranée et adossé aux massifs levantins, ici le Jabal Ansariyya et le Mont Liban;
- La plaine du Ghab, partie intégrante du Croissant fertile, fossé d'effondrement encadré par deux massifs d'orientation méridienne, soumise à des effets de *foehn* et déjà marquée par l'aridité climatique ;
- Les « marges arides » du Croissant fertile, domaine de transition entre la steppe à graminées et le désert, soumis à un climat méditerranéen dégradé ;

- Les paléolacs de Damas, aboutissement du bassin versant endoréique, orienté à l'est, des Wadi Barada et Aouaj, sur les pentes orientales de l'Antiliban ;
- La Syrie du Sud, comprenant la partie supérieure du bassin versant oriental du Yarmouk, affluent principal du Jourdain, et des petits bassins endoréiques orientés au nord faisant transition avec la marge aride.

Les travaux des équipes syrienne, britannique, italienne et espagnole associées permettront de caractériser la Trouée de Homs depuis la dépression de la Bouqaia à l'ouest jusqu'à la zone de Palmyre à l'est, en passant par les secteurs de Homs/Lac Qattineh et de Qatna.

L'ensemble des données du programme a ainsi été collecté sur ces diverses zones prospectées et ponctuellement fouillées (Figure 6), et est rassemblé au sein d'une base de données collaborative.

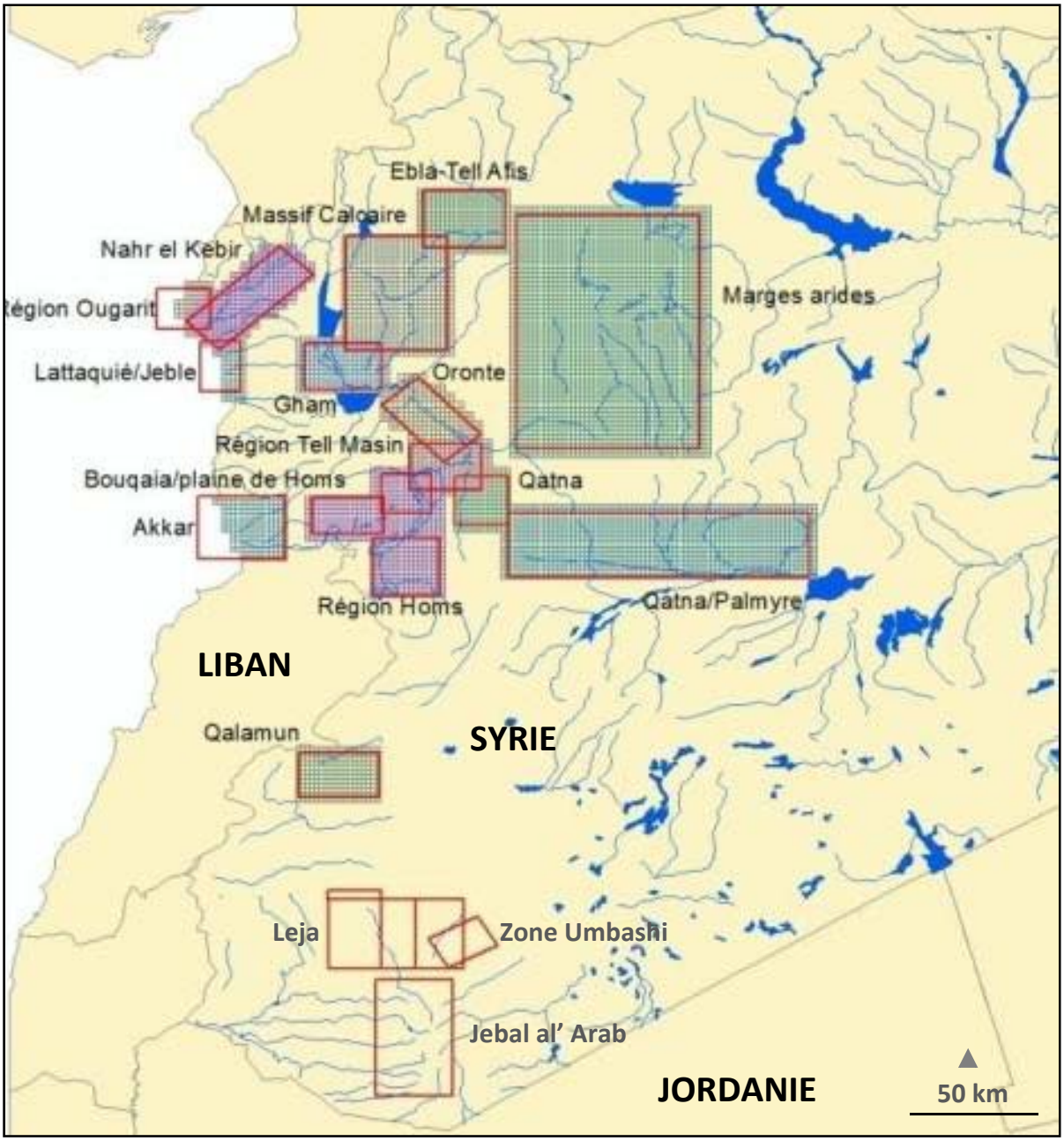


Figure 6 – Carte des secteurs prospectés par les partenaires scientifiques du projet

2. PRESENTATION DE LA BASE DE DONNEES ET DES QUESTIONNEMENTS QU'ELLE SOULEVE

La base de données collaborative PaléoSyr est issue de vingt années d'études micro-régionales archéologiques et paléoenvironnementales et de quinze prospections archéologiques en Syrie. Chacune d'entre elles a produit un jeu de données construit à partir de systèmes de référence différents dans la localisation, la chronologie, la description des attributs archéologiques, etc. En outre, pour chaque champ majeur décrivant la donnée (chronologie, description du site), il est possible de renseigner différents niveaux de détail de la donnée chronologique ou

morphologique, ainsi qu'une information concernant la fiabilité de la donnée enregistrée. Celle-ci rassemble ainsi dans un cadre commun une information massive et très hétérogène, et constitue un outil de description des sites et des aménagements, et de leurs composantes chronologiques et fonctionnelles.

2.1 Conception de la base de données

La base PaléoSYR est constituée de tables MySql installées sur le serveur du CEPAM à Nice, accessibles en ligne après installation sur la machine de l'utilisateur d'un connecteur ODBC configuré de manière adéquate. L'accès aux données se fait par une série de formulaires au format Access.

Cette base s'articule d'une part, autour de tables et, d'autre part, autour de formulaires.

Les tables de référence rassemblent une série de données qui ont été pré-saisies et qui correspondent à des menus déroulants dans les formulaires. Ainsi, dans la table Tabl_MorphologieSite sont répertoriés l'ensemble des types de morphologie proposés pour la saisie, sous la forme d'une liste déroulante, dans le formulaire « sites » (Figure 7).

Les tables de stockage de données sont destinées, quant à elles, à évoluer, et le nombre d'enregistrements qu'elles contiennent va augmenter tout au long de la phase de saisie.

Les formulaires constituent quant à eux une interface entre l'utilisateur et les tables. Ceux-ci facilitent la saisie et permettent d'entrer des données dans différentes tables sans changer de formulaire.

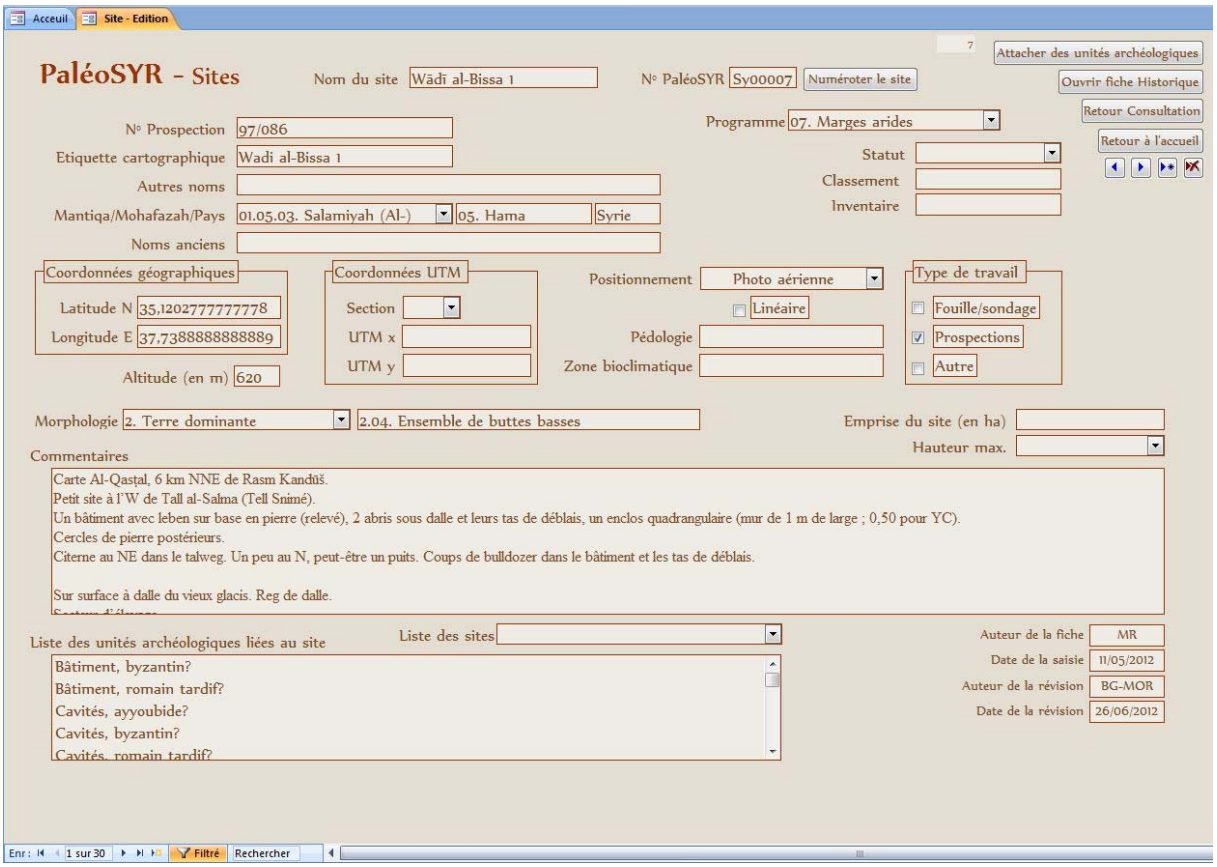


Figure 7 - Impression écran du formulaire "sites" de la base de données PaléoSyr

2.2 Description des données utilisées et de leurs attributs

La base PaléoSYR est fondée sur deux notions : celle de site, et celle des unités archéologiques qui sont des entités constitutives du site.

La notion de site est prise au sens large dans la mesure où, en plus des sites traditionnels avec des vestiges architecturaux identifiables, la base décrit également des indices de site (concentration de matériel céramique et/ou lithique, la présence d'inscriptions et de blocs architecturaux), des aménagements identifiés indépendamment de tout habitat : installations hydrauliques, parcellaire, voies de communication et excavation, naturelle ou non (grottes et abris sous dalle sans architecture associée).

Le site dans son ensemble est ensuite décrit par plusieurs unités archéologiques (UNAR). Cette notion recouvre la fonction d'un aménagement et/ou une attribution chrono-culturelle (datation). Les principales fonctions que l'on dissocie sont les suivantes : bâtiment, aménagement agro-pastoral, aménagement hydraulique, installation funéraire et enfin les vestiges n'appartenant à aucune de ces catégories, que l'on retrouve dans le formulaire Unité archéologique dans le champ

« Type d'unité » : Bâtiment, Agro-pastoral, Hydraulique, Funéraire, Autre. A chaque fonction identifiée doit être attachée une datation.

Par exemple : une ferme avec plusieurs enclos sur laquelle une céramique romaine et byzantine a été ramassée sera décomposée en 4 unités archéologiques :

Nom de l'unité : Ferme, romain ; Type d'unité : Bâtiment

Nom de l'unité : Ferme, byzantin ; Type d'unité : Bâtiment

Nom de l'unité : Enclos, romain ; Type d'unité : Agro-pastoral

Nom de l'unité : Enclos, byzantin ; Type d'unité : Agro-pastoral

Le même principe s'applique dans le cas d'un site fouillé. Dans ce cas, sous le type d'unité « Bâtiment » pourront être regroupées toutes les constructions appartenant à une période chronologique donnée. Dans le cas d'une agglomération occupée à la période romaine et à la période byzantine, on aura par exemple les unités suivantes :

Nom de l'unité : Agglomération, romain ; Type d'unité : Bâtiment. Dans l'onglet « Structures bâties », on pourra ensuite renseigner l'ensemble des édifices en usage pour la période. Par exemple : Maison(s), Temple, Civile, etc.

Nom de l'unité : Agglomération, byzantin ; Type d'unité : Bâtiment. Dans l'onglet « Structures bâties », on pourra ensuite renseigner l'ensemble des édifices en usage pour la période. Par exemple : Maison(s), Église, etc.

Tableau 5 - Extrait de la base de données PaléoSyr

UNAR_ID	UNAR_ Chrono	UNAR_ Site	Morpho_ Site	UNAR_ Typunite	Fiabilité_ Datation	Fiabilité_ Attribution_Chrono
Sy00139	21	1344	2	Agro-pastoral	Incertain	Douteux
Sy00140	34	4774	2	Funéraire	Fiable	Incertain
Sy00141	43	2354	9	Hydraulique	Fiable	Fiable
Sy00142	22	87	1	Bâtiment	Douteux	Incertain
Sy00143	22	208	-	Occupation indéfinie	Douteux	Incertain
Sy00144	45	23	5	Autre	-	-

Le Tableau 5 constitue un extrait de la base de données, avec ses principaux attributs, et les diverses possibilités qu'il est possible d'enregistrer. Il convient à présent de décrire plus précisément chaque attribut de la donnée archéologique.

- *Colonne 1, UNAR_ID* : Identifiant de l'UNAR. La base de données comporte plus de 17 000 UNAR enregistrées. Les informations suivantes ont donc pour objectif de décrire le plus précisément possible l'UNAR considérée.
- *Colonne 2, UNAR_Chrono* : Il s'agit de la période à laquelle l'UNAR a été rattachée. Cette colonne comporte des codes renvoyant à une table spécifique à la chronologie (Tableau 6).

Tableau 6 - Extrait de la table décrivant la chronologie des UNAR

Code_ Chrono	Période_ générale	Sous_période_niv1	Sous_période_niv2	Sous_période_niv3	BCAD_ début	BCAD_ fin
42	Âges des métaux	Âge du Bronze	Âge du Bronze Ancien	Âge du Bronze Ancien Indéterminé	3600	2000
43	Âges des métaux	Âge du Bronze	Âge du Bronze Ancien	Âge du Bronze Ancien I	3600	3000
44	Âges des métaux	Âge du Bronze	Âge du Bronze Ancien	Âge du Bronze Ancien II	3000	2750
49	Âges des métaux	Âge du Bronze	Âge du Bronze Moyen	Âge du Bronze Moyen Indéterminé	2000	1600

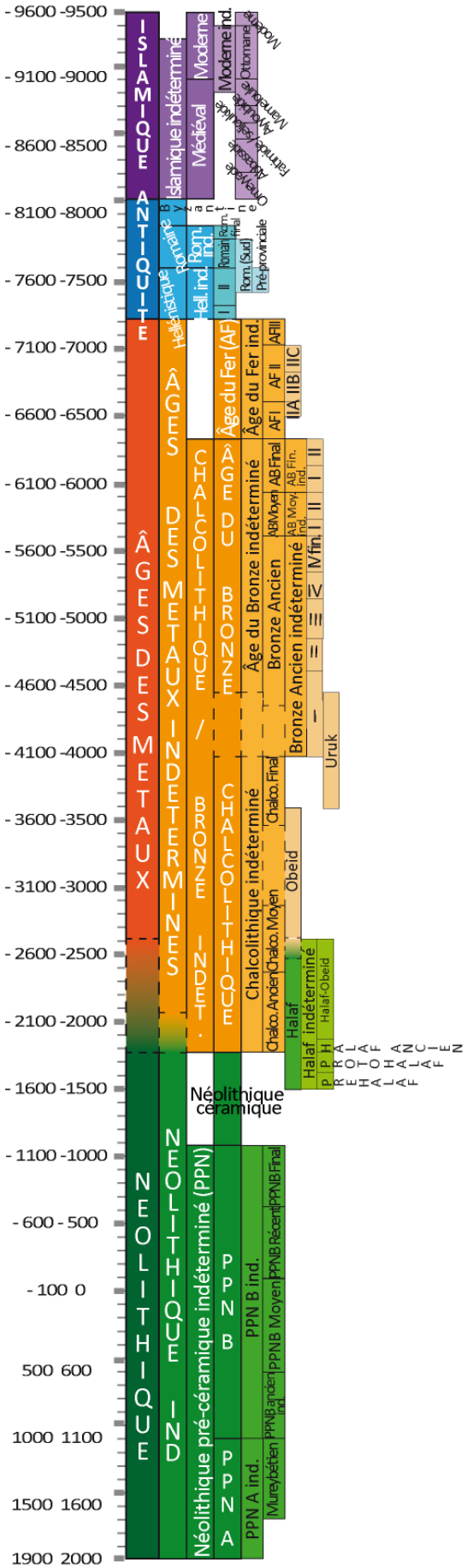


Figure 8 - Frise chronologique de la base de données PaléoSyr, du Néolithique jusqu'à nos jours

En se référant au Tableau 6, on constate que l'information se décline en quatre niveaux de datation : La période générale, et 3 sous-périodes. En outre, on constate que certaines UNAR sont répertoriées comme « indéterminées ». Il s'agit des UNAR qui n'ont pu être attribuées à un niveau plus précis de datation : ainsi, en se référant au Tableau 6, on constate que les UNAR attribuées à la période 42 sont datées de l'Âge du Bronze Ancien, ce qui constitue le niveau de datation le plus précis ayant pu être atteint. Afin de mieux visualiser la succession des périodes dans le temps et les divers niveaux qui se superposent ou se chevauchent, un schéma sous forme de frise chronologique a été élaboré (Figure 8).

- *Colonne 3, UNAR_Site* : cette colonne renseigne la référence du site archéologique auquel est rattachée l'UNAR considérée. Il s'agit ici du site archéologique pris au sens large : il peut s'agir des sites traditionnels avec des vestiges architecturaux identifiables, ainsi que des indices de site (concentration de matériel céramique et/ou lithique), la présence d'inscriptions et de blocs architecturaux, des aménagements identifiés indépendamment de tout habitat : installations hydrauliques, parcellaire, voies de communication et excavation, naturelle ou non (grottes et abris sous dalle sans architecture associée).
- Colonne 4, Morpho_Site : cette colonne indique le code décrivant la morphologie du site auquel l'UNAR est rattachée. Ce code renvoie au Tableau 7.

Tableau 7 - Extrait de la table renseignant la morphologie des sites archéologiques

Morpho_Code	Morpho_1	Morpho_2
9	2. Terre dominante	2.04. Ensemble de buttes basses
29	2. Terre dominante	2.05. Tell à structures multiples et distinctes
28	2. Terre dominante	2.06. Tell
10	3. Pierre dominante	3.01. Tell haut (+ de 5m de haut)
12	3. Pierre dominante	3.03. Murs conservés hors sol

Deux niveaux de précision de l'information concernant la morphologie du site archéologique associé à l'UNAR considérée sont donc disponibles dans ce tableau.

- *Colonne 5, UNAR_Typunite* : cette colonne renseigne la morphologie de l'UNAR considérée, pouvant, si elle est connue, appartenir à l'un de ces quatre types : bâtiment (ou habitat), installation funéraire, aménagement agro-pastoral, aménagement hydraulique ou « autre » (les vestiges n'appartenant à aucune de ces catégories, mais identifiés). Si la morphologie de l'UNAR n'est pas connue, la mention « occupation indéfinie » peut lui être attribuée.

- *Colonne 6, Fiabilité_datation* : cette colonne indique la qualité de la source de datation de l'UNAR, pouvant se décliner en trois niveaux, du plus fiable au moins fiable : fiable, incertain, douteux. Par exemple, une datation relative ou bien fondée sur une détermination céramique ancienne pourra être qualifiée d' « incertaine ».
- *Colonne 7, Fiabilité_ attribution_chronologique* : il s'agit du degré de fiabilité de l'attribution d'une UNAR à une période plutôt qu'à une autre. Par exemple, si un site prospecté n'est associé qu'à une seule période, l'attribution chronologique de ses UNAR sera qualifiée de « fiable », car aucune ambiguïté n'est possible. En revanche, si un site est occupé à plusieurs périodes, l'attribution chronologique d'une UNAR (une structure architecturale par exemple) pourra s'avérer plus « incertaine » en l'absence de fouille donnant plus de précision.

On peut ainsi constater l'hétérogénéité des données contenues dans la base, notamment en ce qui concerne la précision et la fiabilité de l'information. Différents niveaux de qualité de l'information sont renseignés, et constituent la part d' « incertitude » des données. Par ailleurs les 17 000 UNAR enregistrées ainsi que la multitude de renseignements et de tables associées à chacune d'entre elles rendent cette base de données très lourde et difficile à appréhender d'un point de vue global.

3. LES MODELES SPATIO-TEMPORELS ELABORES AU COURS DU PROGRAMME PALEOSYR

3.1 Homogénéisation de la chronologie

Les données de la base PaléoSyr sont issues de missions archéologiques diverses travaillant sur des espaces variés, et utilisant de diverses manières des chronologies déjà elles-mêmes différentes entre elles, et élaborées à partir d'artefacts datés avec plus ou moins de précision. Afin de réunir toutes les données dans un cadre chronologique cohérent, les archéologues du projet ont fait le choix de se référer à une échelle chronologique unique. Conscients des biais que cette homogénéisation impose, ceux-ci ont ainsi introduit la possibilité d'assigner des niveaux de fiabilité de la donnée temporelle enregistrée dans la base.

Il convient de préciser qu'il s'agit bien ici d'un choix conscient et discuté, et qui aurait pu être différent. On peut ici se référer par exemple au choix fait dans le cadre du Fragile Crescent Project, décision différente face à une problématique similaire (Lawrence, Bradbury, 2012) : chacune des différentes références chronologiques des diverses missions ayant alimenté la base de données ont été conservées et mises en parallèle. L'unification de ces diverses chronologies est réalisée sous la forme de probabilités (cf. point 2.2.1 du chapitre 1) (Lawrence, 2012).

3.2 Les cartes « d'attractivité »

Afin de comprendre les conditions des milieux naturels dans lesquels s'inscrivent les sites repérés, une méthodologie ayant pour but de construire des cadres environnementaux à échelle régionale a été élaborée en vue de caractériser les facteurs qui rendent les espaces plus ou moins attractifs pour les activités humaines, et la subsistance des populations. Les premières cartes d'attractivité ont été élaborées dans le cadre du programme PaléoSyr, pour deux zones steppiques de Syrie Occidentale (Figure 9). Le but est de disposer d'une référence régionale permettant d'estimer les potentiels d'utilisation du sol et de pâturage, en synthétisant les conditions et les contraintes environnementales connues à échelle micro-régionale, et en dépassant donc les cartes de pluviométrie. Les espaces ainsi modélisés couvrent les zones bioclimatiques moyennement et faiblement arides (respectivement 200 à 300, et 100 à 200 mm de précipitations par an), où l'occupation et l'utilisation du sol par l'homme seraient les plus sensibles aux variations climatiques.

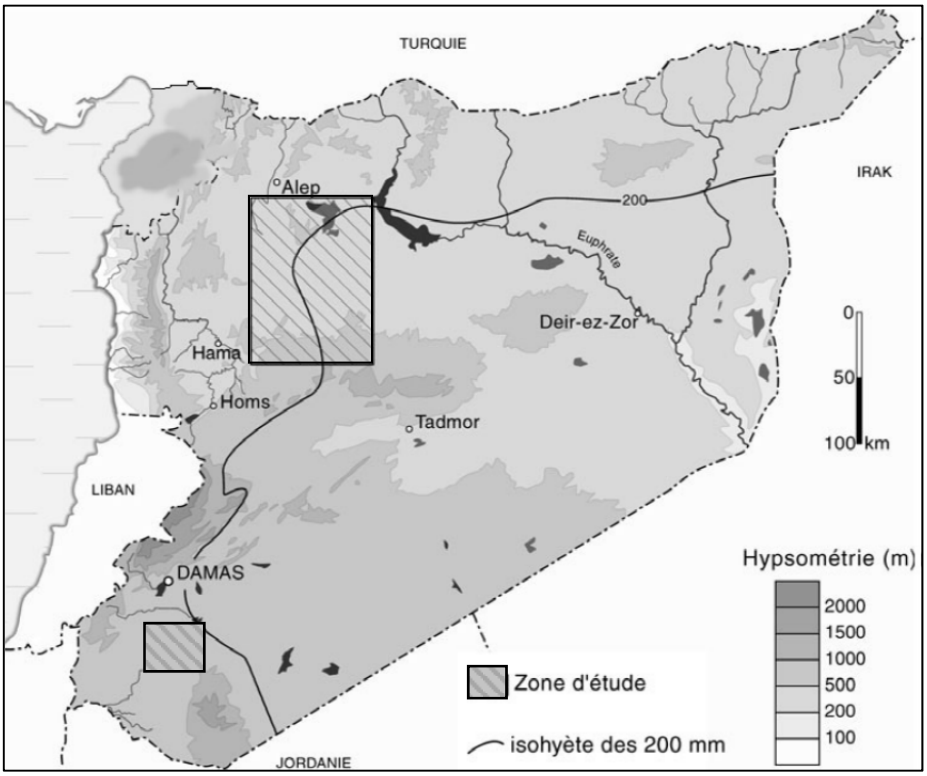


Figure 9 - Zones pour lesquelles les cartes d'attractivité ont été élaborées (d'après Geyer et al., 2005)

Les cartes d' « attractivité » ont été obtenues en croisant la topographie et la géomorphologie, la lithologie, les ressources en eau et les cartes des sols (toutes actuelles), afin de mettre en

perspective l'aridité climatique, et le poids de la composante édaphique pouvant augmenter ou contrebalancer l'aridité.

Le but est également de délimiter, à une échelle régionale, des zones systématiquement occupées pendant l'holocène et celles ayant subi des phases d'abandon ou de diminution du peuplement.

Les premières cartes d' « attractivité » ont été élaborées sur la zone des Marges Arides (Figure 10), en croisant quatre contraintes environnementales : les configurations topographiques (5 classes); les substratums géologiques (6 classes) ; les états de surface ou facteurs édaphiques (9 classes) ; les occurrences de l'eau (7 classes). Cinq classes d' « attractivité » sont issues du croisement de ces facteurs.

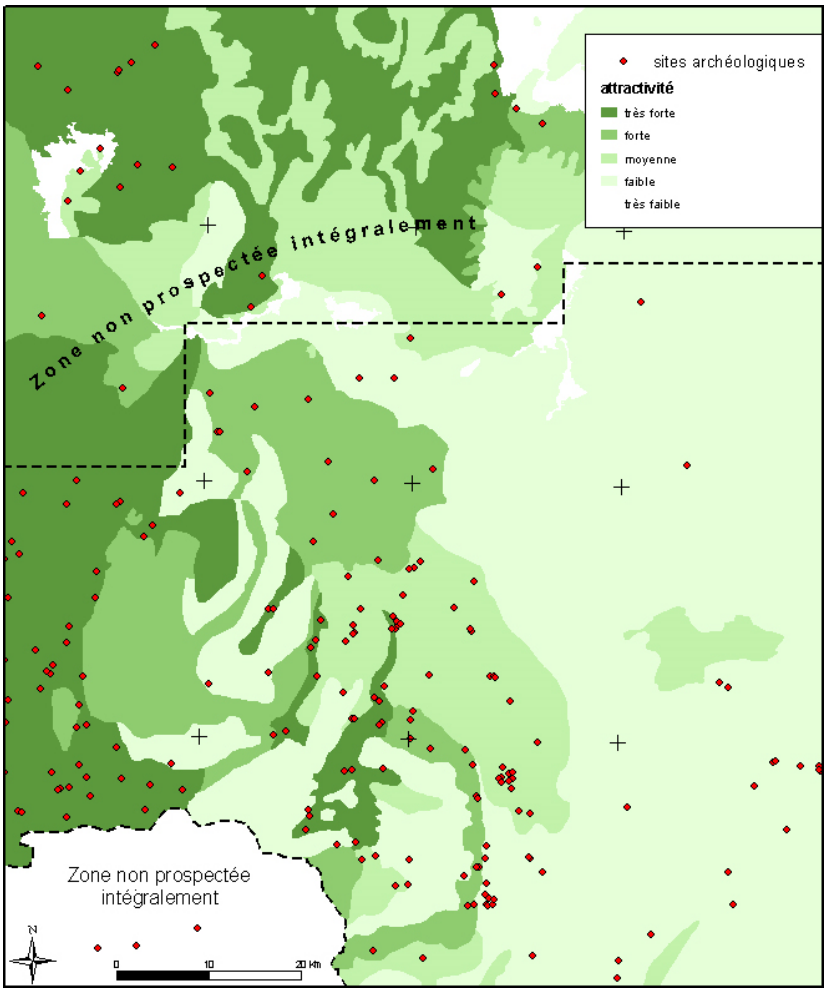


Figure 10 - Répartition du peuplement et carte d' « attractivité » au Bronze Ancien IV (2450 - 2000 av. J.-C.)(Geyer et al., 2006).

A partir de cette expérience, une démarche similaire a été adoptée pour la zone du Leja (Figure 11). Trois contraintes ont ici été croisées : le facteur édaphique (5 classes de couverture des sols) ;

le facteur climatique (4 zones bioclimatiques) et les ressources en eau (création de buffers autour des sources, ponts naturels et cours d'eau). Cinq classes d'attractivité ont ainsi été élaborées.

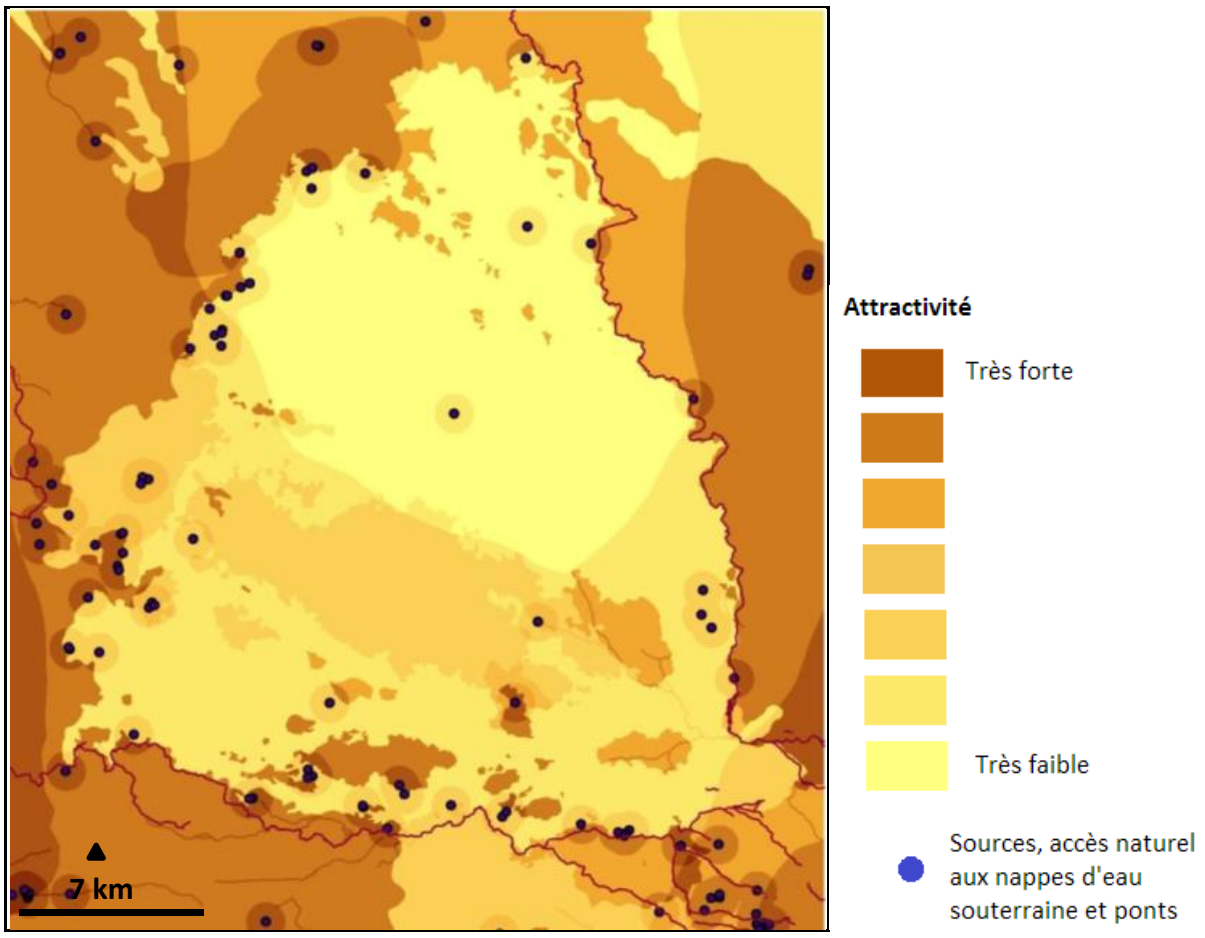


Figure 11 - Carte d' « attractivité » de la zone du Leja (Braemer, Davtian, 2013)

Sur les classes d'attractivité définies ont été par la suite superposés divers aménagements hydrauliques réalisés aux époques étudiées (Figure 12). La démarche consiste donc à décrire à partir des classes d' « attractivité », ou des potentiels agro-pastoraux définis à partir des cartes actuelles, et la variation du potentiel apportée par des aménagements de l'époque considérée (sous forme de buffers). Ainsi, une estimation des changements paysagers dus à la fois aux développements techniques des populations, et aux phénomènes naturels (climatiques ou autres) peut être proposée.

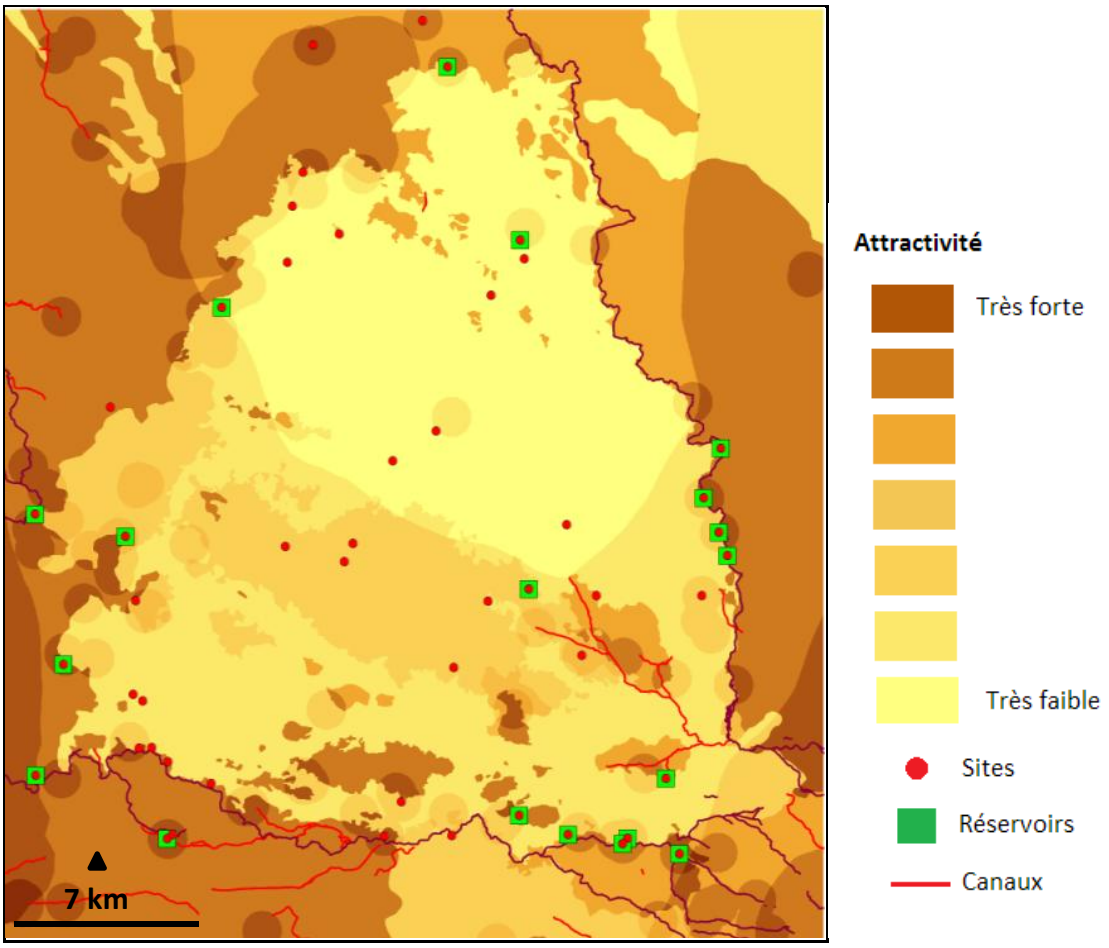


Figure 12 - Carte d' « attractivité » de la zone du Leja, enrichie des aménagements hydrauliques et des sites de l'Âge du Bronze moyen (Braemer, Davtian, 2013)

Les cartes des Marges Arides et du Leja ayant cependant été élaborées par des méthodes différentes, leur portée comparative n'est que très limitée.

3.3 Quantification du potentiel agro-pastoral par l'imagerie satellite

Afin de pouvoir mener une analyse comparative, une nouvelle procédure a été mise en place, toujours dans l'objectif d'élaborer des cartes synthétisant les éléments qualitatifs permettant de qualifier des zones d' « attractives » ou de « répulsives » pour les activités agro-pastorales dans le passé. Afin d'obtenir à la fois un bon niveau de détail spatial et une vue multiscalaire, la base utilisée est une mosaïque de scènes Landsat couvrant la zone étudiée le même jour, afin que le spectre colorimétrique soit homogène du Nord au Sud, ce qui permet une échelle d'étude macro-régionale. Ainsi, à l'échelle de la Syrie occidentale, une première classification générale automatique de la mosaïque de scènes Landsat en vingt classes de couleurs a été réalisée. Trois zones correspondant aux aires d'étude, le Leja et les Marges Arides, ainsi que la zone de prospection de Homs (Philip, Bradbury, 2010) ont été sélectionnées. En s'appuyant sur leur

connaissance du terrain, les archéologues ont relié chaque classe de couleur de chaque zone à la nature, à l'humidité relative et à l'épaisseur des sols. Chaque catégorie a ensuite été analysée séparément, et s'est vue attribuer un niveau de « qualité » sur une échelle de 1 à 5 (Figure 13) : 16 classes ont ainsi été définies. Ces 16 classes ont enfin été regroupées en cinq groupes de potentiel agronomique (Tableau 8). L'ensemble de l'image a été enfin traité et classifié selon les classes retenues ; une carte homogène de l'ensemble de la Syrie occidentale permet ainsi la comparaison des conditions d'une région à l'autre.

Tableau 8 - Groupes de potentiel agronomique à partir des 16 classes de qualité des sols définies (Braemer et al., 2014)

Noms des groupements/géologie	Définition des groupements
Eau	eau
Basaltes potentiel agronomique A	Cl. 8, 12, 15, 17, 19, sur basaltes : Cultures riches, souvent irriguées sur sols épais. Très localement (Homs), formation naturelle couvrante (arbres/arbustes) [A]
Basaltes potentiel agronomique B	Cl. 3, 7, 11, sur basaltes. Cultures généralement riches sur sols bien développés et fonds de vallées [B]
Basaltes potentiel agronomique C	Cl. 16, 18, Cultures sèches généralement sur sols bien hydratés [C]
Basaltes potentiel agronomique D	Cl. 6, 9, 10, 13, 14, 20, sur basaltes. Surfaces généralement non cultivées, sur roche largement décapée ou affleurant, avec localement possibilités de cultures interstitielles, sèches, pauvres. [D]
Basalte potentiel agronomiques E	Cl. 4 Zones anthropisées et généralement construites [E]
Calcaires tendres/ formations superficielles potentiel agronomique A	Cl. 11, 8, 12, 15, 17, 19 sur calcaires tendres et formations superficielles, cultures riches souvent irriguées sur sols bien développés [A]
Calcaires tendres/ formations superficielles B	Cl. 16, 18, 3, 7, sur calcaires tendres et formations superficielles, cultures riches sur sols bien développés. [B]
Calcaires tendres/ formations superficielle potentiel agronomiques C	Cl.13, 14, 20, sur calcaires tendres et formations superficielles, cultures sèches sur sols relativement bien hydratés [C]
Calcaires tendres/ formations superficielles potentiel agronomique D	Cl. 6, 9, 10 sur calcaires tendres et formations superficielles. Surfaces généralement non cultivées, sur roche largement décapée ou affleurant, ou dépressions fermées, avec localement possibilités de cultures interstitielles, sèches, pauvres. [D]
Calcaires tendres/ formations superficielles potentiel agronomique E	Cl. 4 Zones anthropisées et généralement construites [E]
Calcaires durs A	
Calcaires durs potentiel agronomique B	Cl. 3, 11, 12, 19 sur calcaires durs, boisements ou cultures arboriculture, éventuellement en terrasses [B]
Calcaires durs potentiel agronomique C	Cl. 7, 8, 17 sur calcaires durs, forêts ouvertes, maquis ou reboisements [C]
Calcaires durs potentiel agronomique D	Cl. 6, 9, 10, 13, 14, 20, sur calcaires durs, surfaces non cultivées, généralement pauvres en sols sinon décapées, avec végétation naturelle pauvre [D]
Calcaires durs potentiel agronomique E	Cl. 4 Zones anthropisées et généralement construites [E]

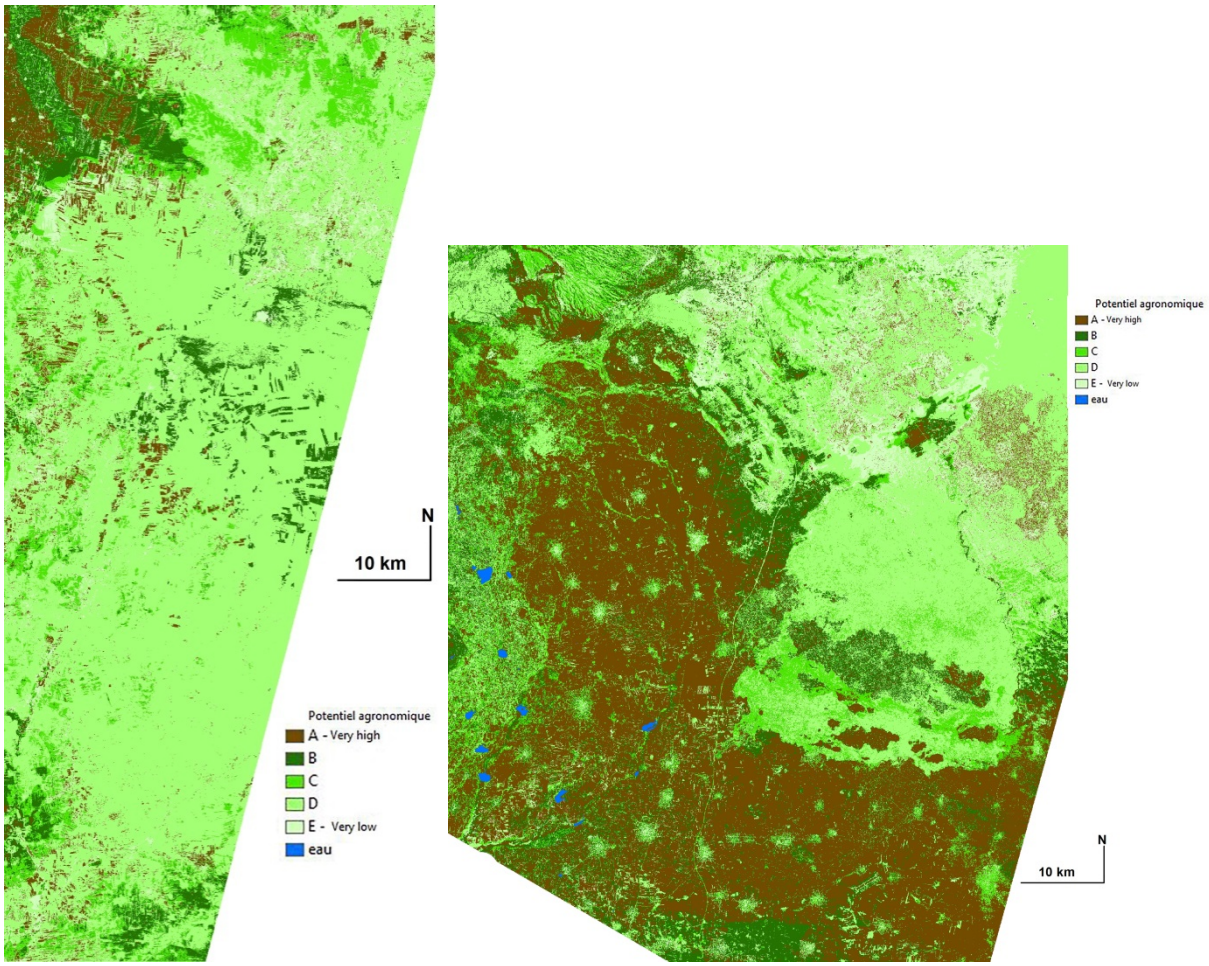


Figure 13 - Potentiel agronomique des Marges Arides et du Leja

3.4 Les fluctuations de l'occupation du sol au cours du temps: confrontation de la Syrie du Sud et des Marges Arides

Les cartes ci-dessus, ayant pour objectif de discrétiser l'environnement au sein duquel les sites étudiés sont situés en diverses classes de « potentiel agro-pastoral », ont été élaborées à partir de données environnementales actuelles. La démarche implicite, et déjà entamée à partir des premières cartes d' « attractivité » réalisées indépendamment pour le Leja et les Marges Arides, consiste donc à confronter ces potentiels avec la localisation des sites, et à évaluer leur concordance, c'est-à-dire, leur valeur explicative dans les logiques d'occupation du sol passées.

Une démarche inverse de modélisation des fluctuations de l'occupation du sol au cours du temps a également été adoptée pour la zone des Marges Arides : à partir des sites existants, les flux et les reflux des déplacements des fronts pionniers entre l'Est et l'Ouest ont été identifiés et matérialisés par les géographes et archéologues du programme sur la Figure 14 : « L'aire occupée par les sédentaires a connu, dans la région de marge aride qui nous intéresse ici, des variations

importantes au cours des temps. La densité des sites et leur localisation ont plus ou moins largement évolué. Sur la base des repérages effectués (près de 1 000 sites ont été répertoriés et analysés), on peut évoquer les déplacements qu'a subis le front pionnier oriental et tenter d'estimer le degré de concordance éventuelle entre ces déplacements, les caractéristiques du milieu naturel (fragilité intrinsèque des milieux steppiques, influence des fluctuations climatiques, variations du support édaphique) et les données historiques (faits sociaux, événements politiques ou économiques, acquisition de techniques, etc.) » (Geyer et al. 2006). Cette région étant en effet aujourd'hui considérée comme une zone de transition entre la zone bioclimatique méditerranéenne, et la steppe hyperaride orientale, les différenciations spatio-temporelles de l'occupation du sol sont envisagées à la lumière des facteurs écologiques contraignants de la zone, notamment l'importance et la variabilité de la pluviosité, le degré de fertilité des sols et les ressources en eau (Geyer et al., 2005).

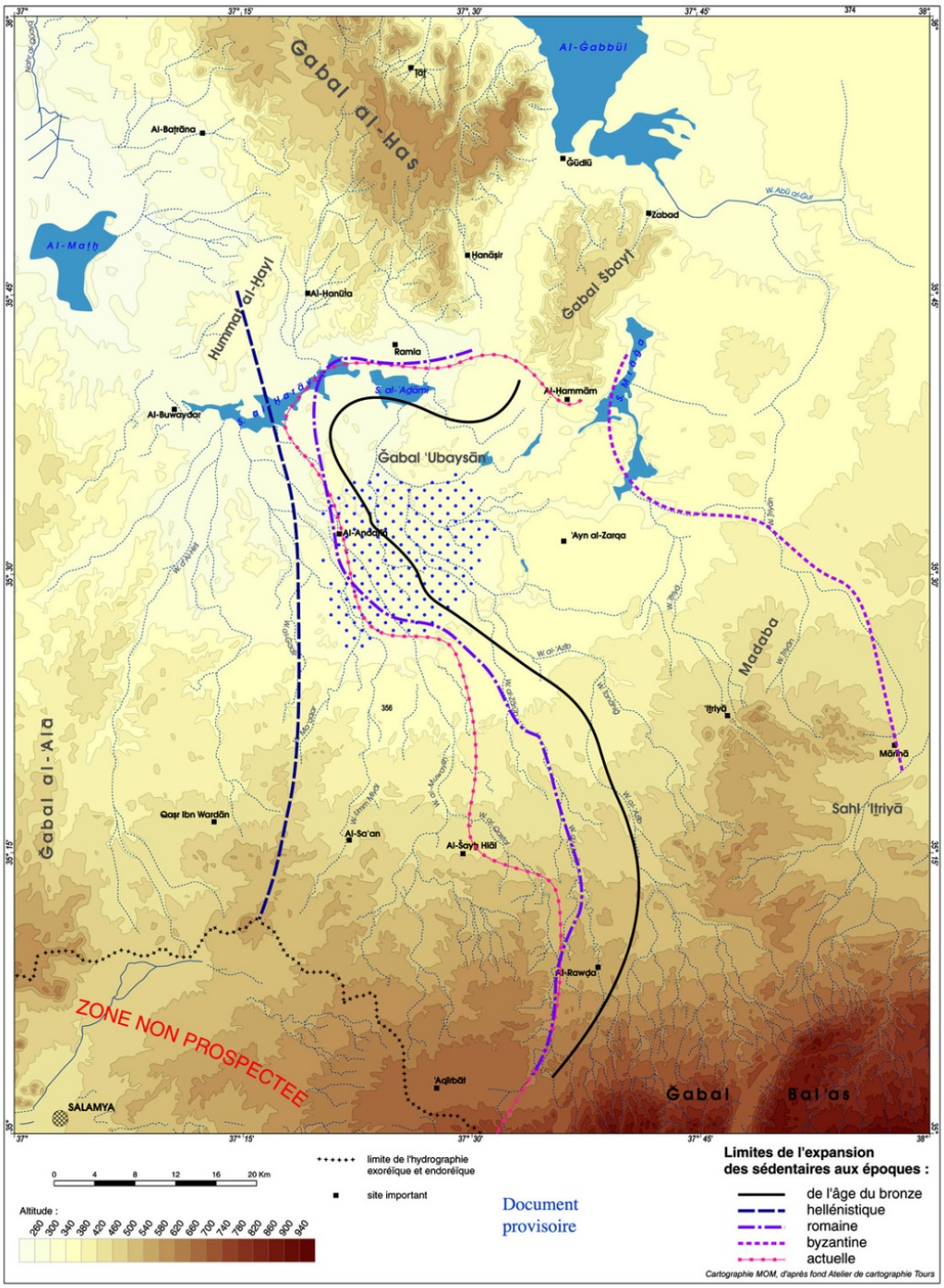


Figure 14 - Limites de l'expansion des populations sédentaires à différentes époques (Geyer et al. 2006)

La figure 14 nous donne une information supplémentaire fondamentale : elle nous indique que la zone Sud-Ouest de l'espace étudié n'a pas été prospectée par les archéologues. Son contenu archéologique nous est donc totalement inconnu.

Cela nous conduit donc à mobiliser un document précieux renseignant les divers niveaux d'intensité de la prospection archéologique pour la Syrie : il s'agit d'une carte (spatialisée dans le

SIG) élaborée par les archéologues du programme PaléoSyr classant les divers niveaux de qualité de la prospection archéologique de la zone étudiée (Figure 15).

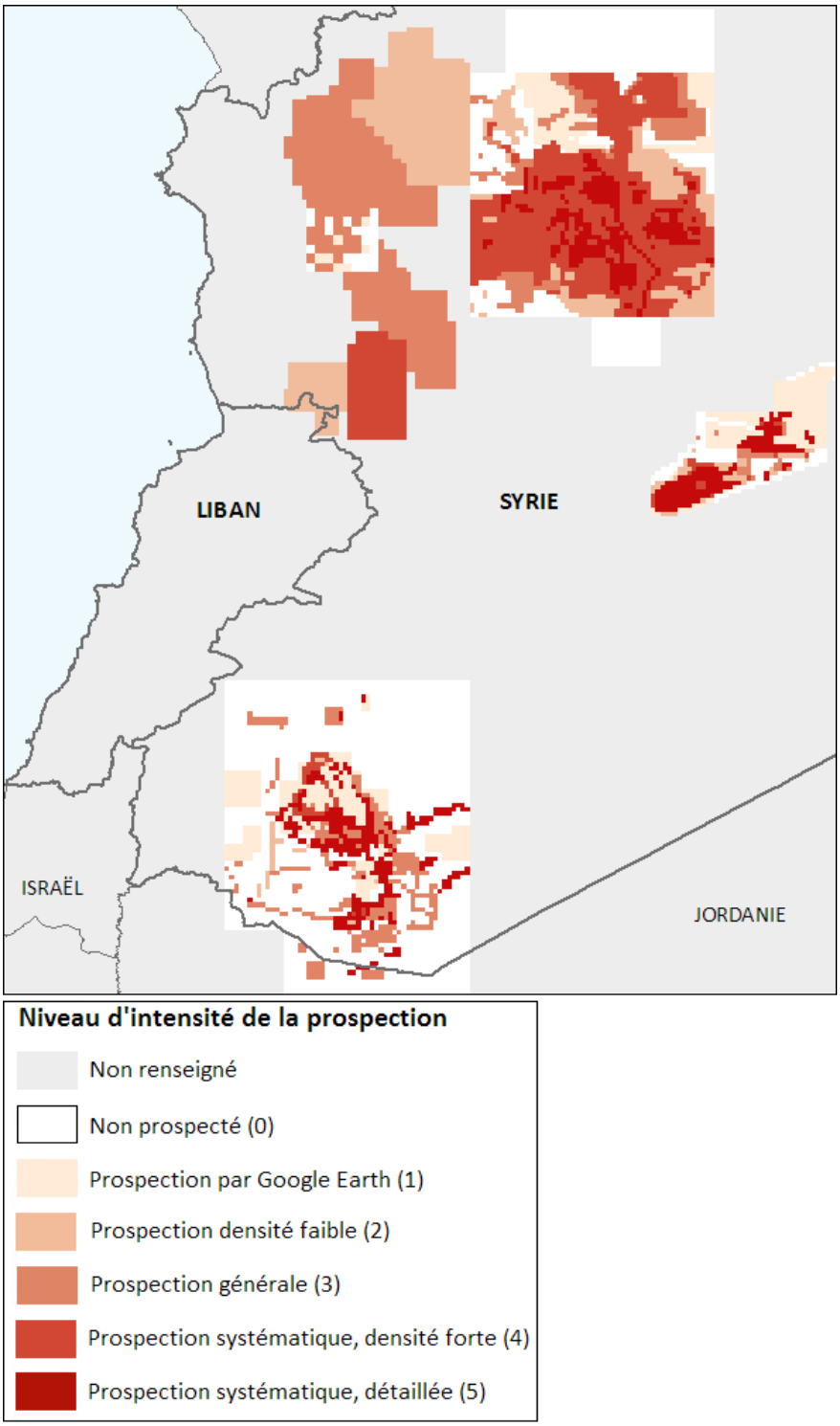


Figure 15 - Niveaux d'intensité de la prospection archéologique en Syrie

Cette carte nous renseigne sur un niveau d'incertitude (ou de « certitude ») supplémentaire, relatif aux données et aux hypothèses d'occupation du sol passée : si nous pouvons être relativement

certains du contenu archéologique de certaines zones (en rouge foncé sur la carte), et donc si nous disposons de tous les indices possibles pour une estimation de l'occupation du sol à diverses périodes, notre connaissance de nombreuses zones est beaucoup plus incertaine. Ainsi, si certains « vides » pourront être interprétés comme une absence de traces d'occupation, d'autres devront être interprétés comme une absence de renseignement.

CONCLUSION

Les objectifs du programme de recherche PaléoSYR recouvrent deux dimensions principales. La première est d'une nature que l'on pourrait qualifier de « thématique », c'est-à-dire directement liée aux problématiques « classiques » d'archéologie ou de géo-archéologie. Celle-ci implique l'attribution d'un sens interprétatif à la donnée archéologique et sa mise en lien avec la donnée environnementale, dans le but de reconstituer les modes d'occupation du sol passés, et leurs variations dans l'espace et dans le temps. La seconde dimension du programme concerne la donnée elle-même, sa qualité, sa fiabilité, sa précision.

De fait, la base de données PaléoSYR (comme la plupart des bases de données, qu'elles soient archéologiques ou non) invite à ce type de questionnement : celle-ci est en effet constituée d'un très grand nombre de données, à la qualité extrêmement hétérogène, et concernant une vaste zone géographique sur près de 20 000 ans. La diversité et l'étendue spatiale et temporelle de l'information confèrent ainsi aux archéologues eux-mêmes une image très floue de leur propre base de données, et donc une marge de manœuvre très limitée dans la dimension « thématique » et interprétative de ces données évoquée plus haut.

C'est cette conscience aiguë du lien entre la qualité de la donnée et son sens, sa portée interprétative, et par extension l'incertitude des interprétations qui en sont issues, qui a poussé les chercheurs du programme à renseigner cette information dans la base PaléoSYR. Les modèles d'occupation du sol ayant été réalisés jusqu'à présent au sein du programme n'intègrent cependant pas cette dimension pour le moment : les diverses cartes d' « attractivité » ou de potentiel agro-pastoral par exemple, ou bien encore la fluctuation des fronts pionniers dans les Marges Arides à diverses époques ne prennent pas en compte l'incertitude des données archéologiques et environnementales, pourtant forte et pouvant remettre en question les hypothèses avancées. Ce qui est d'autant plus gênant que l'optique adoptée est comparative, et vise à confronter des espaces décrits par des données au nombre et à la qualité hétérogène, et inégalement prospectés.

Cet effort de modélisation, de comparaison et de synthèse est pourtant nécessaire, notamment pour un programme de recherche qui touche à sa fin ; la question qui découle de ces considérations consiste ainsi en une réconciliation des deux dimensions du programme évoquées : comment tirer parti au maximum de la diversité de l'information collectée durant des années de recherche sur la zone étudiée, et produire des hypothèses de l'occupation du sol dans le passé, sans « dépasser » les limites de la donnée en fonction de sa qualité -et donc sa portée interprétative- tout en prenant en compte l'incertitude relative à la démarche dans la production des résultats ?

PARTIE II - Conception et application d'une méthodologie d'évaluation de la qualité spatio-temporelle des données dans la longue durée.

A l'origine le mot méthode signifiait cheminement. Ici, il faut accepter de cheminer sans chemin, de faire le chemin dans le cheminement.

Edgar MORIN, 1977

Chapitre 4 : Adaptation d'une méthode d'aide à la décision pour évaluer les variations de la qualité de l'information selon les périodes étudiées.

Chapitre 5 : Répartition spatio-temporelle des données et de la qualité de l'information: l'apport de la géovisualisation.

Chapitre 6 : Exploration et identification des « unités spatio-temporelles significatives » ; méthodologie d'analyse spatio-morphologique exploratoire.

Chapitre 4 : Adaptation d'une méthode d'aide à la décision pour évaluer les variations de la qualité de l'information selon les périodes étudiées.

INTRODUCTION

Dans le contexte d'incertitude décrit précédemment inhérent à la base de données, la nécessité de produire une image plus claire et globale de l'information collectée s'est ainsi rapidement fait sentir, dans le but de visualiser les variations dans le nombre de données et dans les niveaux de qualité et de fiabilité de l'information selon les périodes renseignées. Cette étape du travail était nécessaire non seulement pour le programme PaléoSyr, mais aussi pour l'aboutissement de cette recherche : comme nous l'avons précisé dans le chapitre précédent, notre démarche est double et se situe à la fois au niveau du traitement de la donnée archéologique « pour elle-même », et dans une mobilisation de ce traitement au service d'une étude des structures et des dynamiques spatiales des peuplements passés. Cependant, notre démarche –et la demande- étant avant tout méthodologiques et non thématiques, le choix d'une période et d'une zone géographique d'étude sur la multitude de possibilités offertes par la base de données n'allaient pas de soi, et auraient été, s'ils n'avaient été nourris par l'étape à venir (c'est-à-dire la partie II de cette thèse), totalement arbitraires. Notre parti-pris fut ainsi d'aller du général au particulier, en nous intéressant tout d'abord à la base de données dans son intégralité, puis de resserrer au fur et à mesure de cette exploration, l'éventail des possibles qui s'offraient à nous, non selon des critères thématiques mais selon la plus ou moins grande adéquation des données à notre problématique « géographique et archéologique » (proposer une méthodologie d'analyse exploratoire des structures et des dynamiques spatiales des peuplements passés en contexte incertain), et des diverses échelles spatiales et temporelles qu'elles impliquent.

Ainsi confrontée à notre propre positionnement et à la masse d'informations de la base de données, c'est-à-dire, au besoin de description pour l'orientation d'un choix, l'idée de l'analyse multicritères, méthode d'aide à la décision, s'est rapidement imposée à nous : en orientant celle-ci vers une qualification de l'hétérogénéité de la qualité de l'information, celle-ci nous permettrait à la fois de proposer une image synthétique de cet aspect de la base de données, tout en mettant à

notre disposition les indications nécessaires au choix que nous avons à réaliser. Ce chapitre présente ainsi la mise en place et les aboutissements de cette première étape de l'étude.

1. LA QUALITE DE L'INFORMATION : UN CONCEPT AUX MULTIPLES FACETTES

Définir ce que l'on entend par qualité de l'information peut s'avérer fort difficile étant donnée la diversité de dimensions que prend ce concept. De façon générale, nous souscrivons à la définition de Goodchild (2006): «Quality […] is a measure of the difference between the data and the reality that they represent, and becomes poorer as the data and the corresponding reality diverge. Thus, if data are of poor quality, and tell us little about the geographic world, then they have little value».

Ainsi, dans le cas de données archéologiques et spatiales, évaluer la qualité de l'information est nécessaire afin de pouvoir mesurer notre «légitimité» à formuler certaines hypothèses et interpréter les résultats des analyses effectuées avec ces mêmes données au sujet des structures et des dynamiques spatiales passées. Evaluer la qualité des données nous permet de fixer les limites du cadre interprétatif : objectiver le cadre interprétatif et calibrer les questionnements en fonction des données disponibles. Les poids attribués aux données permettent d'estimer le risque qu'on prend en réalisant telle ou telle interprétation.

Cette procédure s'avère cependant complexe. Naumann et Rolker (2000) en expliquent les raisons: «1) IQ criteria are often of subjective nature and can therefore not be assessed automatically 2) Information sources usually are autonomous and often not publish useful (and possibly compromising quality metadata). Additionally, many sources take measures to hinder information quality assessment. 3) The enormous amount of data to be assessed impedes assessment of the entire formation set. Thus sampling techniques are often necessary which decrease the accuracy of the assessed scores. 4) Information from autonomous sources is subject to sometimes surprising changes in content and quality». Bovee et al. (2003) ajoutent: « Without clearly defined attributes and their relationships, we are not just unable to assess information quality; we may be unaware of the problem. We need to understand the attributes of information quality and to have a broadly applicable, meaningful way to combine evaluations of them into a single quality measure».

Si l'on se réfère à la description des données effectuée dans le chapitre 1, on constate que la qualité de notre information se décline en deux catégories majeures : la précision de l'information, et la fiabilité de l'information (Tableau 9).

Tableau 9 - Précision et fiabilité de l'information de la base de données PaléoSyr

Précision de l'information	Fiabilité de l'information
Morphologie de l'UNAR	Fiabilité de la datation de l'UNAR
Morphologie du site archéologique auquel appartient l'UNAR	Fiabilité de l'attribution chronologique de l'UNAR
Niveau de datation de l'UNAR	

L'enjeu de cette étape du raisonnement est ainsi de répondre aux objectifs énoncés ci-dessus, en tenant compte des diverses caractéristiques inhérentes à la base de données et aux données elles-mêmes, qui complexifient la manœuvre. Les questions qui se posent sont alors :

- Comment évaluer la qualité de l'information en prenant en compte toutes les variables permettant de la décrire ?
- Comment distinguer la fiabilité et la précision de l'information dans cette évaluation ?

Dans cette optique, nous pensons qu'adopter une logique multivaluée peut répondre à nos objectifs et aux caractéristiques de notre base de données. Une analyse multicritère a donc été testée.

2. LE CHOIX D'UNE UNITE TEMPORELLE DE REFERENCE : LE SIECLE

Dans la mesure où il s'agit ici de décrire la qualité de l'information associée aux données de la base PaléoSyr, la question du mode de représentation du temps s'est rapidement posée.

Nous avons opté pour une déconstruction de la chronologie par périodes, et d'une discrétisation de celle-ci par tranches de 100 ans.

Il convient de préciser que ce choix ne relève pas d'un parti-pris thématique fort, mais de la nécessité de choisir une unité de référence continue, nous permettant de visualiser l'information de manière précise mais synthétique. Ce choix relève d'une volonté d'expérimentation en amont de notre étude, et pourra être remis en question par les résultats des premières analyses, et tout au long de l'étude. Nous nous inscrivons donc dans cette pensée de Daniel S. Milo (1992): « Si l'on admet que l'aspect expérimental du siècle réside dans son arbitraire, il faut assumer cet arbitraire ! En d'autres mots, on ne peut fort mal tenir une expérimentation, puis la délaisser car non-rentable. En d'autres mots encore, l'expérimentation séculaire n'a pas produit les résultats escomptés parce qu'on ne l'a pas comprise, donc on l'a mal gérée – du coup, on était incapable d'évaluer les résultats qu'on a quand même produits ».

En outre, 100 ans étant la durée minimale de certaines périodes de la chronologie –dont il est, nous l'avons souligné dans la première partie, extrêmement complexe de se défaire-, nous avons souhaité conserver cette unité de temps : ni trop large, pour ne pas regrouper plusieurs périodes, perdant ainsi la finesse de la datation ; ni trop petite, sachant qu'une datation plus fine que l'échelle du siècle n'a pas été possible pour la plupart des objets archéologiques étudiés –adopter une résolution de 50 ans ne ferait que créer une information extrêmement artificielle et alourdirait notre tâche.

3. ADAPTATION D'UNE METHODE D'AIDE A LA DECISION : L'ANALYSE MULTICRITERE

3.1 Etat de l'art et présentation générale de la méthode

En utilisant l'analyse multicritère (AMC), nous pouvons attribuer à chaque période un niveau de qualité sous forme d'un « score », afin d'identifier celles qui sont le mieux pourvues en termes de qualité et de quantité d'information. Le but est ainsi de définir et d'adapter ce cadre conceptuel et méthodologique aux problématiques et aux bases de données archéologiques.

Diverses écoles ont émergé dans l'AMC depuis les années 1970. Parmi elles, Thomas L. Saaty, professeur à l'Université de Pittsburgh, est le créateur et le premier théoricien de l' « Analytic Hierarchy Process » qui est à la base de la méthode utilisée dans cette étude. Son objectif était de créer une approche qui permettrait de répondre au besoin de réaliser des comparaisons dans le cas où des échelles standard ne seraient pas disponibles pour mesurer les phénomènes de manière absolue, et de dériver des mesures de ces comparaisons (Saaty, 1990 ; 1993 ; 2008).

L'AMC est une méthode d'évaluation multidimensionnelle nous permettant de résoudre des problèmes de décision complexes. Cette approche se fonde sur le principe qu'une solution à un problème de décision peut être trouvée en le divisant en plusieurs petites parts plus facilement appréhendables, et en les intégrant de manière logique (Verhagen, 2006). L'intérêt de la méthode est double : «It provides an overall view of the complex relationships inherent in the situation; and helps the decision maker assess whether the issues in each level are of the same order of magnitude, so he can compare such homogeneous elements accurately» (Saaty 1990).

En contexte d'aide à la décision, l'une des tâches les plus complexes est de sélectionner les éléments importants à considérer dans la prise de décision. L'AMC nous fournit un moyen de classer ces éléments, une fois sélectionnés, dans une structure hiérarchique, allant d'un but général jusqu'à plusieurs critères, sous-critères et alternatives en niveaux successifs (Saaty, 1990). Cette méthode a été appliquée dans divers champs de recherche tels que le changement

climatique, la finance ou les risques, domaines où des buts multiples et conflictuels compliquent souvent la tâche des décideurs, afin que ceux-ci puissent bénéficier de résultats systématiques et concrets leur permettant d'adopter les politiques adaptées à la situation. Ainsi, l'objectif de l'AMC dans ce contexte n'est pas de calculer quelle est la « bonne » décision, mais de contribuer à améliorer la connaissance dans des situations impliquant des risques, plusieurs critères, et des intérêts multiples (Bell et al., 2003). Cette méthode a été rarement appliquée en archéologie, et lorsqu'elle l'a été, elle avait une fonction prédictive. Il s'agissait alors d'évaluer le potentiel archéologique d'une zone, les limites des zones de prospection et les procédures de planification (Verhagen, 2006, 2007 ; Krist, 2006). En outre, les archéologues ont exploité le potentiel de l'analyse multicritères afin de déterminer les surfaces-coûts dans l'exploration des paysages à échelle régionale, afin de construire et valider des modèles des développements sociaux passés, et prendre en compte les liens sociaux entre les groupes d'individus (Howey 2007).

Notre problème de décision est donc ici très différent des applications communes de l'AMC: nous souhaitons classer les diverses périodes identifiées dans la base de données en fonction de la qualité de l'information permettant de les décrire, par l'élaboration d'un certain nombre de critères pouvant permettre d'évaluer l'information archéologique. En d'autres termes, il s'agit d'identifier les siècles pour lesquels l'information disponible maximise la précision et la fiabilité des données, et minimise donc l'incertitude. Il convient de préciser que les critères, alternatives et points de vue déterminés dans cette étude et décrits plus loin ont été identifiés en fonction d'informations propres à notre base de données et à nos objectifs. La solidité et la flexibilité de la méthode assurent toutefois sa reproductibilité à diverses problématiques et bases de données.

3.2 Déroulement de la procédure d'analyse multicritère

3.2.1 Etape 1: définir les objectifs

Il s'agit tout d'abord de définir un ou plusieurs état(s) final(aux) souhaité(s). Le nôtre est de classer les périodes de la chronologie de notre base de données en fonction de la qualité de l'information qui les caractérisent (précision et fiabilité de l'information).

3.2.2 Etape 2: identifier les alternatives

Les alternatives sont les diverses options que l'on souhaite classer, dans notre cas, les périodes de la chronologie. Ce qui implique de choisir un mode de division du temps pour cette étude, sachant que celles-ci n'ont pas toutes la même durée, et s'échelonnent en plusieurs sous-périodes (cf. chapitre 1).

Nous avons choisi ici de raisonner en dates calendaires plutôt qu'en périodes. Nous avons ainsi choisi de diviser la chronologie, et donc la base de données en intervalles de 100 ans, le siècle étant le niveau de précision -ou la durée- maximum atteint dans la base de données. Chaque intervalle de 100 ans est caractérisé par les données et leurs caractéristiques qui y correspondent, et considéré comme une entité à part entière.

Ainsi, nos alternatives, ou en d'autres termes, les éléments que l'on souhaite hiérarchiser, sont chacun des intervalles de 100 ans présents entre le début du Néolithique (-9600 av JC) jusqu'à aujourd'hui, ce qui nous donne un total de 116 alternatives.

Les alternatives sont notées i = 1, …… I.

3.2.3 Etape 3: définir et quantifier les critères

L'objectif de cette étape est de définir un ensemble de critères concis à partir desquels l'information va être évaluée (Eppler, Wittig, 2000). Les critères sont donc les diverses caractéristiques de la qualité de l'information que l'on juge pertinentes (en théorie et en fonction de la base de données) pour analyser les alternatives. Ce sont les aspects en fonction desquels chaque alternative sera examinée et comparée aux autres. On ne raisonne pas ici en nombres absolus, mais en nombres relatifs. Saaty (1993) souligne cet aspect de la méthode : «Measurements on a scale are simply indicators. They must be interpreted in some human value system to make sense».

Il convient à présent de présenter les cinq critères que nous avons choisis pour leur aptitude, selon nous, à caractériser la qualité de l'information de la base de données, et donc hiérarchiser chacune des alternatives. Des échelles de mesure ont été définies afin d'évaluer la correspondance entre chaque critère et chaque alternative. Ces calculs ont été appliqués tout d'abord à chaque UNAR de la base de données, afin de situer chacune d'entre elles sur les échelles de valeurs définies pour chaque critère. Les valeurs de chaque UNAR pour chaque critère ont ensuite été additionnées en fonction de l'alternative –l'intervalle de 100 ans- à laquelle elles appartiennent. Les explications qui suivent montrent la procédure d'évaluation de chaque UNAR pour chaque critère défini.

- *Critère 1* : L'information dont on dispose à propos de la morphologie de l'UNAR, c'est-à-dire, notre niveau de connaissance sur le type d'UNAR en question.

Si la fonction de l'UNAR n'est pas déterminée dans la base de données, (c'est-à-dire : si l'UNAR est répertoriée comme une « occupation indéfinie » dans le Tableau 5), un pourcentage de

connaissance est défini en se basant sur la morphologie du site auquel l'UNAR est associée (Tableau 10).

Tableau 10 - Probabilités (en %) pour que chaque type d'UNAR soit représenté dans un site en fonction de la morphologie de ce dernier (Braemer, Fusco)

Morpho1	Morpho2	Bâtiment	Funéraire	Agro-pastoral	Hydraulique	Autre	Indéfini
1. Indice de site	1.01. Concentration matériel lithique	75%	0	0	0	0	25%
1. Indice de site	1.02. Concentration matériel céramique	33%	33%	33%	0	0	
1. Indice de site	1.03. Groupe d'inscriptions (2 et plus)	50%	50%	0	0	0	0
1. Indice de site	1.04. Eléments architecturaux (2 et plus)	75%	25%	0	0	0	0
1. Indice de site	1.05. Différence de couleur de sol	0	0	0	0	0	100%
1. Indice de site	1.06 Faible relief	0	0	0	0	0	100%
2. Terre dominante	2.01. Tell haut (+ de 5 m de haut)	80%	20%	0	0	0	0
2. Terre dominante	2.02. Tell + ville basse	80%	20%	0	0	0	0
2. Terre dominante	2.03. Tell bas (moins de 5m de haut)	80%	20%	0	0	0	0
2. Terre dominante	2.04. Ensemble de buttes basses	80%	20%	0	0	0	0
2. Terre dominante	2.07. Tell + site au pied	80%	20%	0	0	0	0
2. Terre dominante	2.06. Tell	80%	20%	0	0	0	0
2. Terre dominante	2.05. Tell à structure multiples et distinctes	80%	20%	0	0	0	0
3. Pierre dominante	3.07. Tell + site au pied	80%	20%	0	0	0	0
3. Pierre dominante	3.01. Tell haut (+ de 5 m de haut)	80%	20%	0	0	0	0
3. Pierre dominante	3.05. Kôm, rujum, tas de cailloux	0	75%	25%	0	0	0
3. Pierre dominante	3.03. Murs conservés hors sol	80%	20%	0	0	0	0
3. Pierre dominante	3.04. Murs arasés	80%	20%	0	0	0	0
3. Pierre dominante	3.02. Tell bas	80%	20%	0	0	0	0
3. Pierre dominante	3.06. Tell	80%	20%	0	0	0	0
4. Matériaux mixtes	4.01. Tell haut (+ de 5 m de haut)	80%	20%	0	0	0	0
4. Matériaux mixtes	4.02. Tell bas (moins de 5m de haut)	80%	20%	0	0	0	0
4. Matériaux mixtes	4.03. Murs visibles, arasés, hors sol	80%	20%	0	0	0	0
4. Matériaux mixtes	4.04. Ensemble de buttes basses	80%	20%	0	0	0	0
5. Cavité /excavation	5.01. Abri(s) sous roche	80%	20%	0	0	0	0
5. Cavité /excavation	5.02. Grotte	80%	20%	0	0	0	0
5. Cavité /excavation	5.03. Excavation	80%	20%	0	0	0	0
5. Cavité /excavation	5.04. Nécropole isolée (tombes à fosse)	0	100%	0	0	0	0
6. Hydraulique hors site	6.00. Hydraulique hors site	0	0	0	100%	0	0
7. Voies et communications	7.00. Voies et communications	0	0	0	0	100%	0
8. Trame parcellaire	8.01. Trame parcellaire	0	0	100%	0	0	0
8. Trame parcellaire	8.02. Terrasses	0	0	100%	0	0	0

Par exemple, si le site archéologique est répertorié comme étant un Tell, nous savons que l'UNAR en présence pourrait avoir eu, avec une probabilité égale, une fonction d'habitat ou

funéraire. Une valeur faible sera donc attribuée à cette UNAR dans l'échelle de mesure du critère, le niveau d'incertitude étant ici élevé.

Le Tableau 10, croisant les différents types de morphologie des sites archéologiques et les probabilités pour que chaque type d'UNAR y soit représenté a donc été créé, en se basant sur la connaissance de terrain des archéologues du projet.

A partir de ce tableau, des indices ont été créés afin d'attribuer à chaque UNAR la valeur correspondant à sa représentation dans le critère 1 (Tableau 11). Chaque indice représente ainsi notre niveau de connaissance sur la morphologie de chaque UNAR.

Tableau 11 - Indice attribué à chaque UNAR en fonction du degré de connaissance disponible sur sa morphologie

Pourcentage de connaissance sur la morphologie de l'UNAR (cf. Tableau 10)	Indice attribué à l'UNAR
100% d'une catégorie (sauf indéfini)	20
80% d'une catégorie, 20% d'une autre	10
75% d'une catégorie, 25% d'une autre	8
50% pour deux catégories	6
25% d'une catégorie, 75% d'indéfini	5
33% pour trois catégories	4
100% d'indéfini	0

Cette approche, malgré ses failles (impossibilité de détecter les exceptions, indices et pourcentages attribués de manière empirique) permet toutefois de dépasser une approche binaire connaissance/absence de connaissance, en distinguant les UNAR qui pourraient avoir n'importe quelle fonction, et celles pour lesquelles les possibilités sont plus restreintes (et donc, l'incertitude plus faible). Il va de soi que les pourcentages attribués ainsi que les indices peuvent être discutés : le but n'est pas ici d'obtenir une information certaine, mais de proposer une démarche expérimentale, un des chemins possibles pour prendre en compte l'hétérogénéité de l'information.

La Figure 16 illustre la manière dont chaque UNAR, puis chaque alternative est quantifiée pour le critère 1.

1

UNAR_ID	UNAR_Chrono	UNAR_Typunite	SITE_MorphoSite
Sy00008-16	75	Agro-pastoral	1
Sy01869-02	46	Autre	18
Sy00135-12	9	Bâtiment	2
Sy02485-01	41	Funéraire	11
Sy06350-01	60	Funéraire	26
Sy00008-11	62	Hydraulique	0
Sy00236-09	14	Occupation indéfinie	2
Sy00428-26	62	Occupation indéfinie	3
Sy00439-01	66	Occupation indéfinie	4
Sy00454-15	62	Occupation indéfinie	5
Sy00565-06	49	Occupation indéfinie	7
Sy03210-03	60	Occupation indéfinie	25

2

Clef	MRPH_morpho1	MRPH_morpho2	Bâtiment	Funéraire	Agro-pastoral	Hydraulique	Autres	Indéfini	INDICE
2	1. Indice de site	1.01. Concentration matériel lithique	75					25	5
3	1. Indice de site	1.02. Concentration matériel céramique	33	33	33				4
4	1. Indice de site	1.03. Groupe d'inscriptions (2 et plus)	50	50					6
5	1. Indice de site	1.04. Eléments architecturaux (2 et plus)	75	25					8
7	2. Terre dominante	2.02. Tell + ville basse	80	20					10
25	5. Cavité /excavation	5.04. Nécropole isolée (tombes à fosse)		100					20

3

UNAR_ID	UNAR_Chrono	UNAR_Typunite	SITE_MorphoSite	INDICE
Sy00008-16	75	Agro-pastoral	1	20
Sy01869-02	46	Autre	18	20
Sy00135-12	9	Bâtiment	2	20
Sy02485-01	41	Funéraire	11	20
Sy06350-01	60	Funéraire	26	20
Sy00008-11	62	Hydraulique	0	20
Sy00236-09	14	Occupation indéfinie	2	5
Sy00428-26	62	Occupation indéfinie	3	4
Sy00439-01	66	Occupation indéfinie	4	6
Sy00454-15	62	Occupation indéfinie	5	8
Sy00565-06	49	Occupation indéfinie	7	10
Sy03210-03	60	Occupation indéfinie	25	20

4

Alternatives	Total critère 1
-8000 -7900	1732
-7900 -7800	1832
-7800 -7700	1832
-7700 -7600	1832
-7600 -7500	1832
-7500 -7400	1832
-7400 -7300	1832
-7300 -7200	1832
-7200 -7100	2925
-7100 -7000	2925
-7000 -6900	2925

Figure 16 - Critère n°1: des UNAR aux alternatives.

Le passage de l'étape 3 à l'étape 4 sur la Figure 16 (c'est-à-dire, le passage des UNAR et de leurs indices de connaissance à chaque alternative) est décrit sur le Tableau 12.

Tableau 12 - Calcul de la valeur représentant le critère n°1 pour chaque alternative

	Indices de connaissance							
Alternative	**0**	**4**	**5**	**6**	**8**	**10**	**20**	**Total critère 1**
-15000 -14900	0	0	5	0	0	16	17	(5*5) + (16*10) + (17*20) = **525**
...	*Nombre d'UNAR de l'alternative représentées par l'indice*							...
-7100 -7000	0	1	27	0	7	79	97	(1*4) + (27*5) + (7*8) + (79*10) = **2925**

- *Critère 2 :* La fiabilité de la datation de l'UNAR. Ce critère permet d'évaluer la fiabilité de la datation des UNAR (et des alternatives). Un indice a été attribué à chaque niveau de fiabilité des UNAR (Tableau 13).

Tableau 13 - Indices de fiabilité de la datation des UNAR

Fiabilité de la datation de l'UNAR	Indice
Fiable	3
Incertain	2
Douteux	1
Non connue	0

Le total des indices de fiabilité de la datation des UNAR pour chaque alternative a été calculé comme pour le critère n°1 (Tableau 14).

Tableau 14 - Calcul de la valeur représentant le critère n°2 pour chaque alternative

	Fiabilité de la datation				
Alternative	**0**	**1**	**2**	**3**	**Total critère 2**
-15000 -14900	1	0	20	24	(20*2) + (24*3) = **112**
...	*Nombre d'UNAR de l'alternative représentées par l'indice*				**...**
-7100 -7000	4	0	84	126	(84*2) + (126*3) = **546**

- *Critère 3 :* la fiabilité de l'attribution chronologique de l'UNAR : Ce critère permet d'évaluer la fiabilité de l'attribution chronologique des UNAR (et des alternatives). Un indice a été attribué à chaque niveau de fiabilité des UNAR (Tableau 15).

Tableau 15 - Indices de fiabilité de la datation des UNAR

Fiabilité de l'attribution chronologique	Indice
Fiable	9
Incertain	6
Douteux	3
Non connue	0

Le total des indices de fiabilité de l'attribution chronologique des UNAR pour chaque alternative a été calculé comme pour le critère n° 2 (cf. Tableau 14).

- *Critère 4 :* Le nombre d'UNAR « indéterminées » dans l'alternative. Ce critère permet de classer les siècles (alternatives) en fonction du nombre d'UNAR dites « indéterminées » (cf. tableau 5) dans leur attribution à une période en particulier, et celles qui sont datées avec plus de précision.

On calcule ici un ratio en divisant le nombre d'UNAR « déterminées » par le nombre d'UNAR « indéterminées » pour chaque tranche de 100 ans. En outre, une contrainte supplémentaire a été introduite dans l'élaboration de ce critère : la chronologie générale de la base de données étant déclinée en 4 niveaux de précision sous forme de sous-périodes (cf. tableau 6), nous avons considéré dans notre calcul que si l'indétermination de l'UNAR est survenue au troisième niveau de datation, l'incertitude sera moins élevée que si elle survient au second. Ainsi, le but étant de détecter les alternatives les plus fiables et précises, ici plus le ratio calculé est élevé, plus le score de l'alternative sera bon, et plus celle-ci sera privilégiée. La procédure de calcul est décrite sur le Tableau 16.

Tableau 16 - Calcul des valeurs du critère 4 pour chaque alternative

	Niveau de datation 2		Niveau de datation 3		Niveau de datation 4	
Alternatives	**UNAR déterminées**	**UNAR indéterminées**	**UNAR déterminées**	**UNAR indéterminées**	**UNAR déterminées**	**UNAR indéterminées**
-15000 -14900	0	2	35	8	50	2
-7100 -7000	0	73	26	131	0	0

	Indices des niveaux de datation			
	1	**3**	**6**	
Alternatives	**Ratio N2**	**Ratio N3**	**Ratio N4**	**INDICE**
-15000 -14900	0	35/8 = **4,3**	50/2 = **25**	(4,3*3) + (25*6) = **227,4**
-7100 -7000	0	26/131 = **0,2**	0,000	0,2*3 = **0,6**

- *Critère 5 :* Le niveau de datation maximum atteint pour l'UNAR. Ce critère reprend une information déjà impliquée dans la construction du critère 4, mais l'intègre cette fois-ci non plus comme un facteur de pondération du critère mais comme un critère déterminant à part entière. Le niveau atteint dans la datation de l'UNAR est ainsi considéré comme un niveau de précision. Aucun calcul n'a été nécessaire pour l'élaboration des valeurs de ce critère, qui sont tout simplement les niveaux de datation 2,3 et 4.

Cinq critères ont ainsi été élaborés, et les valeurs qu'ils prennent pour chaque alternative, et qui permettront de hiérarchiser celles-ci ont été calculées. L'information créée est synthétisée dans le Tableau 17.

Tableau 17 – Synthèse : signification et procédure de création de chaque critère

	Définition	Méthode de calcul	Echelle
Critère 1	Information sur la morphologie de l'UNAR.	- Si UNAR = «Agro-pastoral», «funéraire», «bâtiment», «hydraulique», «autre» →100% de connaissance; - Si UNAR = «indéterminée» → on se réfère à la morphologie du site auquel elle appartient	De 0 à 20
Critère 2	Fiabilité de la datation de l'UNAR.	Information déjà disponible dans la base de données.	**0** = Non renseigné **1** = Douteux; **2** = Incertain; **3** = Fiable.
Critère 3	Fiabilité de l'attribution chronologique de l'UNAR	Information déjà disponible dans la base de données.	**0** = Non renseigné; **3** = Douteux ; **6** = Incertain; **9** = Fiable.
Critère 4	Nombre d'UNAR indéterminées	(nombre d'UNAR déterminées / nombre d'UNAR indéterminées) x niveau de datation maximum atteint	Plus le résultat est élevé, plus l'incertitude est faible.
Critère 5	Niveau de datation maximum atteint	Information déjà disponible dans la base de données.	De 2 à 4.

Les critères sont notés j = 1, …… , J.

3.2.4 Etape 4: définir les points de vue et les poids des critères

L'AMC a pour particularité de permettre la définition de divers sous-objectifs, appelés les points de vue. Ces éléments permettent d'implémenter diverses règles de décision, en accordant des poids différents aux divers critères en fonction du point de vue que l'on souhaite examiner : «Broadly speaking, the purpose of criterion (…) weights is to express the importance of each criterion relative to other criteria» (Malczewski 1999).

Nous avons identifié deux points de vue, en fonction de la dimension de la qualité d'information que l'on souhaite mettre en relief: le point de vue de la précision, et celui de la fiabilité de l'information.

Les points de vue sont notés v = 1, ….. , V

Nous avons à présent déterminé un ensemble d'alternatives, de critères, de points de vue et leurs poids respectifs. Les données peuvent alors être organisées sous la forme de deux matrices de décision :

- La matrice d'impacts (Tableau 18) notée E possède I lignes et J colonnes ; les éléments e (i,j) représentent les valeurs attribuées à l'alternative i évaluée en fonction du critère j.

$$E = \begin{pmatrix} e\,(1,1) & \cdots & e\,(1,J) \\ \vdots & & \\ e\,(I,1) & \cdots & e\,(1,J) \end{pmatrix}$$

Tableau 18 - Extrait de la matrice d'impacts

Alternatives	Critère 1	Critère 2	Critère 3	Critère 4	Critère 5
-2200 -2100	16893	2652	6349	1,21	4
-2100 -2000	16893	2652	6349	1,21	4
-2000 -1900	8748	1462	3149	2,43	3
-1900 -1800	10538	1749	3777	2,43	3

- La matrice des points de vue (Tableau 19) notée W (est composée de j lignes et v colonnes. Les éléments p (j, v) représentent le poids attribué au critère j du point de vue v. Le poids est intuitivement déterminé par l'utilisateur, en fonction de sa connaissance de la situation décrite.

$$W = \begin{pmatrix} p\,(1,1) & \cdots & p\,(1,V) \\ \vdots & & \vdots \\ p\,(J,1) & \cdots & e\,(J,V) \end{pmatrix}$$

Tableau 19 - Matrice des points de vue

	Fiabilité	Précision
Critère 1	5	5
Critère 2	8	8
Critère 3	10	8
Critère 4	5	10
Critère 5	5	10

La Figure 17 récapitule les premières étapes réalisées dans l'AMC.

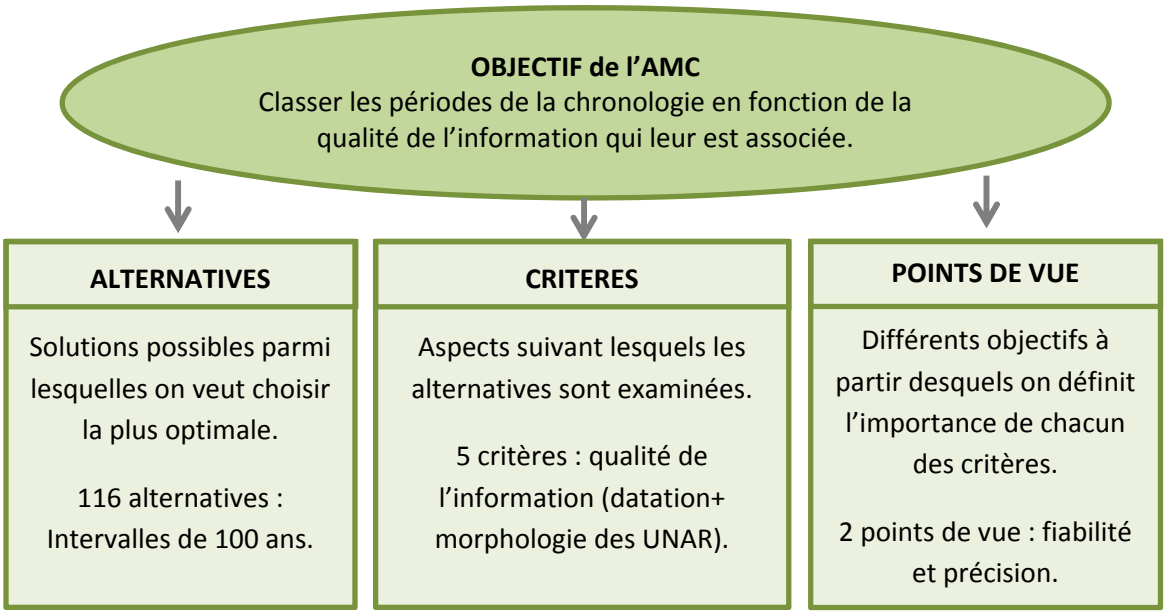


Figure 17 - Récapitulatif des premières étapes de l'AMC

3.2.5 Etape 5: calcul et hiérarchisation des scores de chaque alternative

Le but de l'AMC est d'évaluer et classer chacune des alternatives i par chacun des points de vue v, afin d'obtenir un score final s (i, v). Notre méthode de calcul implique que les valeurs les plus élevées représentent les alternatives optimales, et les critères les plus importants.

Les AMC ici présentées ont été réalisées à l'aide de MULTI, un programme développé par le Politecnico di Milano (département Architecture et Aménagement).

Les éléments de la matrice d'impacts ne sont souvent pas directement comparables s'ils ont été obtenus, comme c'est le cas ici, par des calculs différents impliquant des échelles différentes. Les valeurs assignées aux alternatives i en fonction d'un critère j n'ont qu'une valeur intrinsèque en relation avec ce critère en particulier. La normalisation des valeurs est donc nécessaire afin de rendre les données comparables entre elles.

Dans la formule qui suit, e' (i, j) renvoie à l'élément normalisé obtenu à partir des données initiales e (i, j). Nous avons choisi la méthode de normalisation zéro-max (proposée dans le programme MULTI), afin de ne pas perdre d'importantes informations sur les valeurs de la meilleure et de la moins bonne alternative pour chaque critère. Dans cette méthode, on divise les éléments de la colonne j par le plus élevé d'entre eux (e_max(j)):

$$e'(i, j) = \frac{e(i, j)}{e_max(j)}$$

Par cette méthode, nous obtenons des valeurs normalisées par les valeurs de e (i, j) comprises entre e_min(j)/e_max(j) et 1, 1 demeurant la valeur maximale. Ainsi, les rapports entre e (i, j) demeurent inaltérés.

Une fois les données normalisées, nous avons déterminé la valeur des alternatives pour chaque point de vue, et de la sorte, un classement final. Le programme MULTI nous offre plusieurs méthodes de calcul possibles, que nous avons choisi de tester afin d'évaluer leur impact sur le résultat final.

- La somme pondérée: il s'agit de la méthode la plus simple à effectuer. Elle implique les deux matrices S = E * W, où les scores s (i, v) sont calculés en multipliant les deux matrices ligne par colonne :

$$s\ (i,v) = \sum_{j} e\ (i, j) * p\ (j, v)$$

- L'analyse de la concordance et de la discordance : cette méthode de calcul confronte les alternatives avec toutes les autres prises individuellement. Pour chaque couple d'alternatives confrontées, la méthode analyse combien de critères prévalent pour l'alternative étudiée plutôt que pour les autres (analyse de la concordance) et calcule l'effet global de séparation, c'est-à-dire le point où chaque critère distingue l'alternative étudiée des autres (analyse de la discordance).

4. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

4.1 Application n°1 de l'AMC : à la base de données entière, depuis le début du Néolithique jusqu'à aujourd'hui

Afin de tester la sensibilité des résultats aux paramètres de calcul, ainsi que la robustesse du classement final, nous avons appliqué tour à tour les deux méthodes expliquées ci-dessus.

La Figure 18 montre les résultats des quatre AMC réalisées, replacés sur la séquence chronologique de la base de données. Les courbes bleue et rouge représentent les scores de chaque alternative en fonction des deux points de vue identifiés (précision et fiabilité de la donnée). La courbe noire indique le nombre de données (le nombre d'UNAR) de chaque alternative, nous ayant permis de calculer l'AMC. Cette courbe nous rappelle de ne pas mésestimer le poids du nombre de données dans notre analyse : certaines alternatives comprennent en effet une centaine d'UNAR, tandis que d'autres en contiennent deux mille. Les fluctuations des résultats des AMC peuvent ainsi en être grandement influencées.

Afin de diminuer le poids du nombre de données dans l'analyse, deux des AMC ont été calculées en divisant chaque valeur de la matrice d'impacts par le nombre de données total qui la composent. Le Tableau 20 récapitule ainsi les méthodes de calcul et les données utilisées pour les quatre AMC réalisées.

Tableau 20 - Données et méthodes utilisées pour chaque AMC

	AMC 1	**AMC 2**	**AMC 3**	**AMC 4**
Données utilisées	Valeur du critère	Valeur du critère / nombre d'UNAR	Valeur du critère	Valeur du critère / nombre d'UNAR
Méthode de calcul	Somme pondérée	Somme pondérée	Analyse de la concordance et de la discordance	Analyse de la concordance et de la discordance

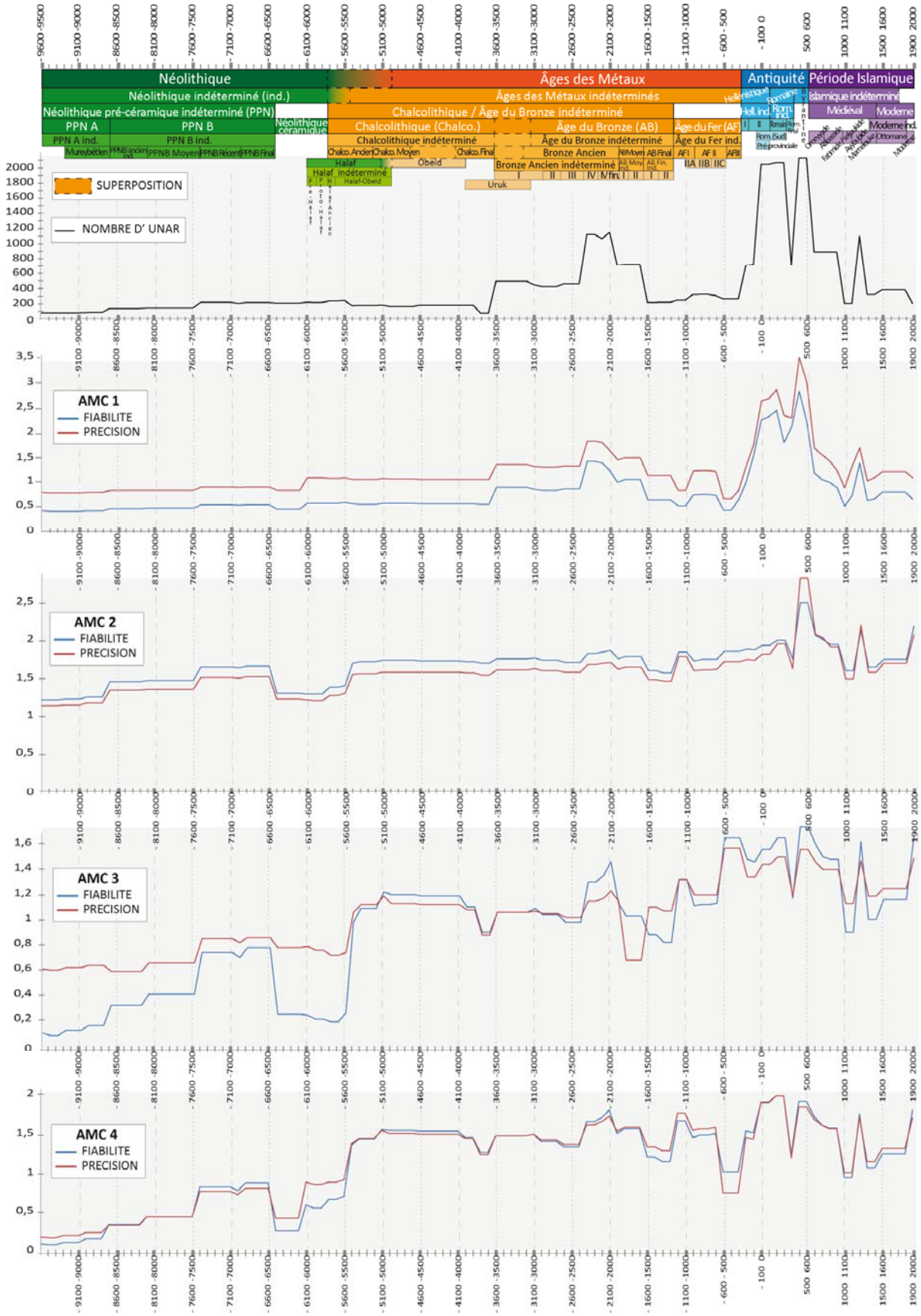


Figure 18 - Résultats de la première application de l'AMC: sur la totalité de la base de données

Les AMC 1 et 2 ont été calculées par la méthode de la somme pondérée, méthode de calcul la plus simple pour apprécier la tendance globale des variations de la qualité de l'information en fonction de chaque alternative. On constate ainsi que les périodes comprises entre le début du Néolithique et la fin du Chalcolithique sont décrites par des données à la fois peu nombreuses, et au niveau de qualité très bas, tant en précision qu'en fiabilité.

Les âges du Bronze ancien et moyen semblent mieux pourvus, tandis que les courbes retombent à partir de l'âge du Bronze récent jusqu'à la fin de l'âge du Fer. Un pic dans la qualité des données est atteint à l'Antiquité, notamment aux périodes Romaine et Byzantine, toutefois entrecoupées d'une légère baisse à la période Romaine tardive. Les courbes baissent ensuite à nouveau à la période Islamique (avec une légère remontée à la période Ayyoubide), la plus récente, et atteignent le même niveau de qualité que les données décrivant l'âge du Bronze.

Les deux points de vue n'introduisent pour le moment aucune différence dans l'analyse, les courbes sont en effet très proches l'une de l'autre. Il est cependant évident que les fluctuations de la qualité de l'information détectées dans la première AMC sont très proches des variations dans le nombre de données, qui ont pu conditionner les résultats.

En divisant les scores de chaque alternative par le nombre de données qu'elles comportent (AMC 2), nous observons de -9600 à -6400 un comportement identique des courbes à l'AMC 1, mais aux variations plus marquées. A partir de -3700, alors que le nombre de données augmente considérablement par rapport aux périodes antérieures, l'analyse tend à atténuer les variations des courbes, en particulier entre -1500 et 200 où la hausse constatée plus haut est ici gommée, et les niveaux de qualité ramenés au même niveau que ceux de la période Néolithique. Quelques inversions sont également notables : alors que l'AMC 1 indiquait une baisse dans la qualité des données à l'âge du Fer, l'AMC 2 montre une légère hausse à cette période – et qui sera confirmée dans les AMC suivantes. En outre, si la hausse observée à la période Romaine est moins accentuée que précédemment, le pic observé à la période Byzantine demeure.

La méthode de la somme pondérée a donc ici certainement une tendance à lisser les résultats, notamment lorsqu'on leur ôte l'influence du nombre de données : l'AMC 2 rééquilibre les résultats en remontant le niveau de qualité des périodes anciennes, et en réduisant les scores des périodes mieux pourvues. Cette courbe indique globalement une qualité de l'information assez constante dans la base de données au fil des périodes, où ne sont notables que des baisses au début et à la fin du Néolithique, et une hausse à la période Byzantine et, dans une moindre mesure, à la période Ayyoubide.

Cette remarque est toutefois fortement remise en cause dès lors qu'on change de méthode de calcul. La méthode de la concordance et de la discordance fait fluctuer les courbes intensément, même durant les périodes précédemment identifiées comme constantes. Les oscillations des courbes ne suivent en outre pas nécessairement les variations dans le nombre de données.

Dans l'AMC 3, la qualité de l'information tend à augmenter alors que l'on avance dans le temps. Trois paliers sont cependant notables dans cette augmentation : le premier du début du Néolithique jusqu'à -5400, le second de -5400 à -600, et le dernier de -600 à aujourd'hui. En outre, les courbes ne sont pas parfaitement stables à l'intérieur de ces trois paliers.

Le premier palier nous indique que la précision des données suit la même tendance que dans les deux précédentes MCA, alors que la courbe représentant la fiabilité se détache de celle-ci et indique des résultats bien plus bas, sauf entre -7500 et -6500.

Les deux courbes se rejoignent à nouveau à -5500 et augmentent alors, marquant le début du second palier. Cette augmentation ne semble pas liée à une croissance du nombre de données, qui s'observe plutôt au début de l'âge du Bronze. C'est en outre à cette période que survient un décalage dans la fiabilité et la précision des données, qui s'opposent significativement.

Le troisième palier est caractérisé par des fluctuations bien plus rapides, avec des alternances de pics et de creux tous les deux cents ans en moyenne. Les deux courbes se suivent cependant à nouveau. La forte baisse à la période Romaine tardive et le pic à la période Byzantine sont toujours visibles, mais moins marqués que sur les courbes précédentes.

La quatrième AMC confirme les tendances observées jusqu'à présent. Les courbes adoptent un comportement proche de l'AMC 3, mais les oppositions entre précision et fiabilité notées précédemment ne sont plus ici visibles, et les deux courbes se superposent presque parfaitement au fil des périodes. L'âge du Fer III est en outre ici marqué par une baisse dans les valeurs, s'opposant à la hausse constatée jusqu'à présent.

Dans un esprit de synthèse, diverses informations peuvent être extraites de l'observation et de la comparaison de ces courbes.

Chaque graphique apporte une dimension nouvelle à l'analyse, et offre au lecteur l'opportunité de mettre en lumière ses divers aspects. Chaque résultat ne doit donc pas être considéré individuellement, mais au regard de tous les autres. L'analyse exploratoire qui est réalisée ici n'a en outre aucunement pour objectif d'identifier un résultat « parfait » ou attendu, mais de tester diverses options, en faisant varier les règles de l'analyse, et en extraire le niveau d'information souhaité et adapté à l'utilisation que l'on souhaite en faire. Chaque résultat est en soi, une partie du problème et une partie de la solution, qui ne prend tout son sens que s'il est confronté aux

autres résultats. Chaque graphe met ici en valeur une « catégorie » particulière de scores, qu'il s'agisse des extrêmes ou de résultats plus intermédiaires.

Divers niveaux de qualité de l'information sont ici révélés selon la méthode de calcul sélectionnée. Si l'on considère la séquence chronologique de façon globale, il semble évident que la qualité de la donnée augmente à mesure qu'elle concerne des périodes de plus en plus récentes. Ce phénomène est particulièrement visible dans les AMC 3 et 4, où la qualité de l'information progresse par paliers successifs. Ces paliers ne correspondent cependant pas au passage d'une grande période (Néolithique, Âges des Métaux…) à une autre, et n'impliquent pas des résolutions temporelles similaires.

Le niveau le plus bas de la qualité de l'information correspond au début du Néolithique, et perdure jusqu'à la période Halaf tardive. La dernière partie du Néolithique est ainsi incluse dans le second palier, qui se termine au début de l'âge du Fer. Le niveau le plus élevé dans la qualité de l'information couvre ainsi l'âge du Fer, l'Antiquité et la période Islamique. Un zoom plus détaillé montre que les courbes fluctuent au sein de chaque palier, et appellent à un niveau d'observation plus fin : dans le premier palier, la qualité de l'information augmente au PPNB ancien et final, et baisse dans les 400 premières années du Néolithique céramique. Le second palier est, quant à lui, plus stable, et peut être considéré à un niveau d'observation intermédiaire. Le dernier palier demande à être considéré plus précisément, à un niveau d'observation de 200 ans pour en percevoir les pics (périodes Romaine, Byzantine et Ayyoubide) et les chutes (Périodes Romaine tardive, Fatimide-Seljoukide, et Mamelouke).

Ces remarques nous conduisent à remettre en question la manière dont les dynamiques des systèmes de peuplement et les changements dans l'occupation du sol passés sont classiquement appréhendés, notamment dans la longue durée, et dans les approches comparatives. Une représentation claire et globale, une « big picture » des bases de données archéologiques devraient avoir de grandes répercussions dans la manière dont nous considérons la continuité spatiale et temporelle de ces données. Ce qui peut, et doit s'accompagner d'une remise en question sur la manière dont nous choisissons nos périodes et nos échelles temporelles d'étude, afin de ne pas confondre les fluctuations des phénomènes humains et environnementaux, et les fluctuations de la qualité et du nombre de données qui les décrivent. Le choix des périodes et des échelles d'étude peut également être orienté par ces informations.

4.2 Application n°2 de l'AMC : approche comparative entre les données des Marges Arides, et celles de la Syrie du Sud.

Afin de tester l'intérêt de cette méthode dans une approche comparative, nous avons extrait deux jeux de données de la base de données PaléoSyr : le premier concerne les sites archéologiques localisés dans les Marges Arides du Croissant Fertile, une zone de transition entre steppe et désert (zone la plus au Nord sur la Figure 19), et le second, les sites de la partie la plus méridionale de la Syrie. Les Marges Arides et la Syrie du Sud ayant fait l'objet de diverses études comparatives (cf. partie I), il s'agit ici de comparer la qualité des données sur lesquelles ont porté ces études.

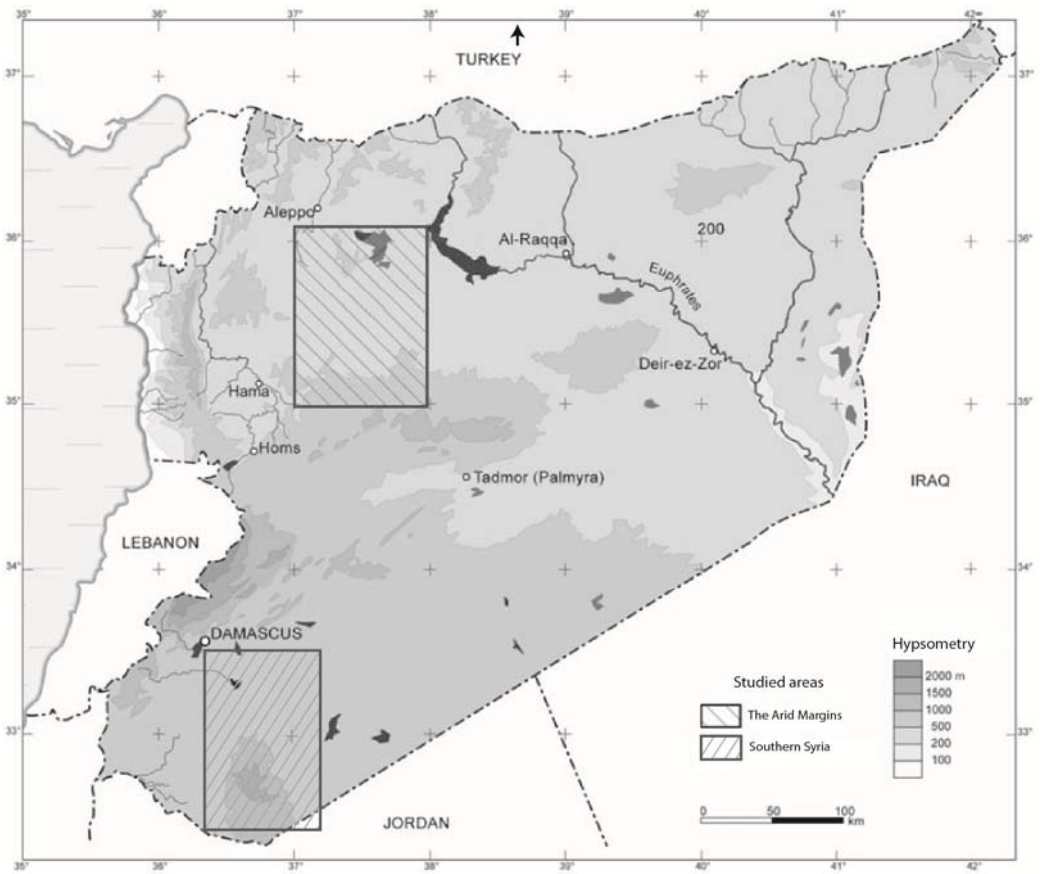


Figure 19 - Carte de situation des zones comparées (d'après Geyer et al., 2005)

Les méthodes de calcul décrites ci-dessus ont ainsi été appliquées successivement sur les deux jeux de données. Les résultats sont présentés sur la Figure 20.

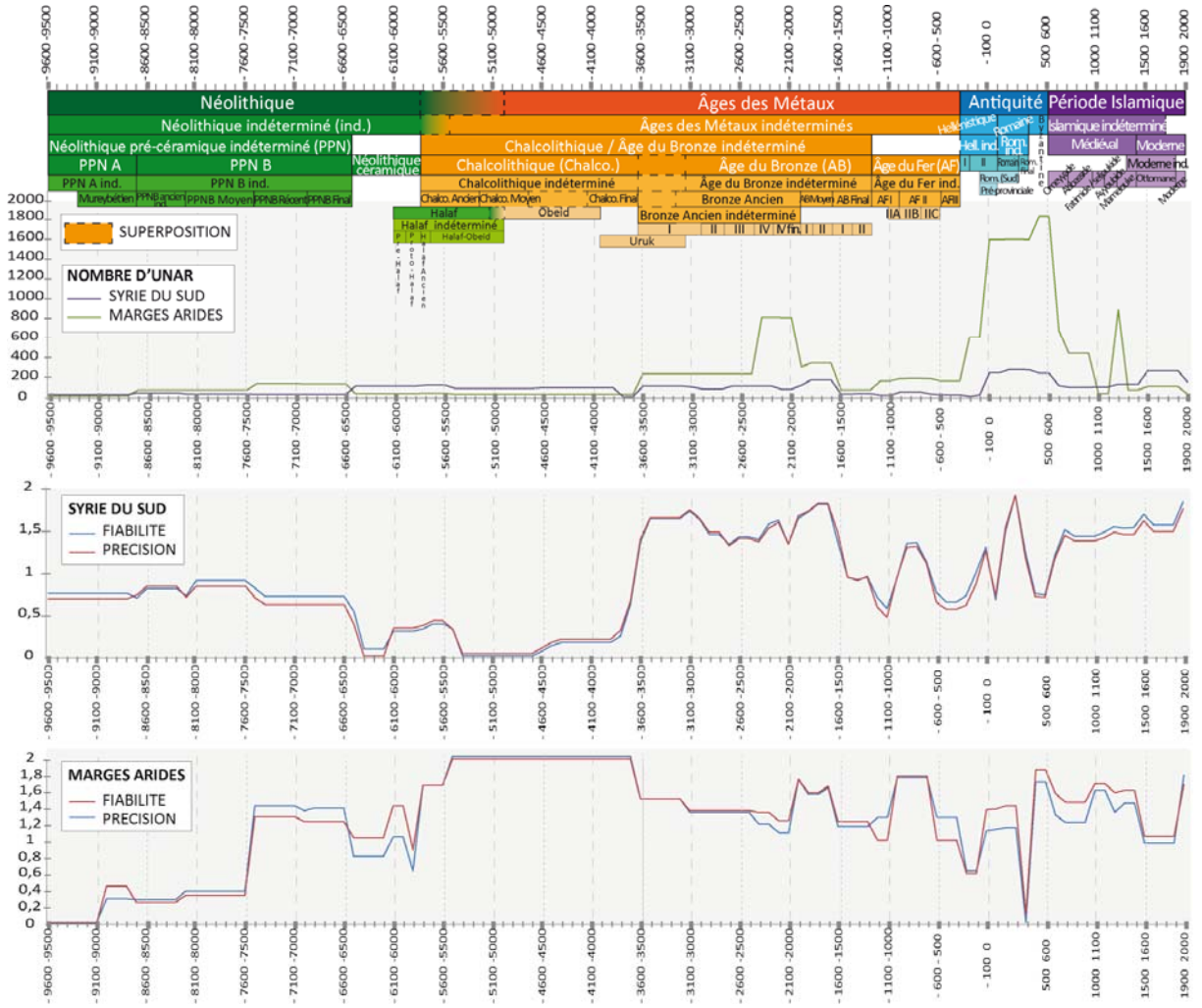


Figure 20 - Résultats de l'application n°2 de l'AMC: approche comparative entre les Marges Arides et la Syrie du Sud

Le premier graphique nous indique que le nombre de données varie fortement au cours du temps, et diffère entre les deux jeux de données considérés. Bien que les données concernant les Marges Arides (7888 UNAR) soient bien plus nombreuses que celles décrivant la Syrie du Sud (1851 UNAR), diverses observations doivent être considérées avant toute interprétation des résultats. En effet, les variations des courbes et leurs différences peuvent indiquer une réalité de terrain, c'est-à-dire une véritable baisse dans l'occupation du sol à une période donnée par exemple, mais également un artefact de la base de données provoqué par une saisie incomplète de données.

Nous savons ici que la différence entre les deux courbes à l'Antiquité est la conséquence d'un état d'enregistrement des données plus avancé pour l'équipe des Marges Arides – contrairement à l'âge du Bronze Final ou la période Mamelouke, où les oppositions dans les courbes témoignent d'une véritable réalité de terrain. Le pic observé à l'âge du Bronze IV pourrait alors être bel et

bien lié à une expansion démographique en Syrie Centrale, corrélée avec une augmentation de la densité et de la taille des sites.

Les graphiques témoignent d'un phénomène intéressant : les choix de saisie des deux équipes archéologiques y sont lisibles. En effet, les courbes représentant la précision et la fiabilité en Syrie du Sud se superposent presque parfaitement, tandis que celles des Marges Arides sont bien moins proches. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que l'équipe de Syrie du Sud fut plus « tranchée » dans ses attributions chronologiques, contrairement à l'équipe des Marges Arides qui a conservé plus de niveaux d'incertitude dans ses données.

En outre, il semble clair que l'échelle chronologique mobilisée par l'équipe de Syrie du Sud est plus fine que celle déployée par l'équipe des Marges Arides pour la période Chalcolithique, les âges du Bronze et du Fer, et que l'inverse se produit aux périodes Romaine, Byzantine et Islamique. La chronologie moins fine au Chalcolithique et aux âges du Bronze I à III dans les Marges Arides peut s'expliquer par le peu de sites datés de ces périodes, et par la nature de ces sites : de très petits campements, dépourvus d'éléments de datation. Distinguer le Chalcolithique de l'Âge du Bronze Ancien aurait donc véhiculé une fausse idée de la précision des données en Syrie du Sud, contrairement aux Marges Arides où cette distinction peut être réalisée plus aisément.

CONCLUSION

L'objectif de cette étape des traitements était de mettre en place une approche permettant de considérer un ensemble de données non pas directement pour leur dimension interprétative mais pour le poids qu'il est possible de leur accorder dans l'interprétation, en d'autres termes, leurs niveaux de fiabilité et de précision. Il s'agit ainsi dans un premier temps d'analyser les données non pour le contenu de l'information qu'elles nous transmettent, mais pour leur aptitude à matérialiser la réalité que l'on cherche à retracer, en quantifiant cette aptitude. Nous soulignons ainsi l'intérêt de mettre les données en perspective, notamment lorsqu'elles ont été collectées et saisies par des équipes différentes –dont chacune présente ses propres choix, méthodes et objectifs- afin de s'assurer que les phénomènes que l'on observe et interprète ne sont pas des artefacts mais bien les marqueurs interprétables d'une réalité passée. Une représentation claire et globale des données nous offre cette opportunité, et nous a permis :

- D'évaluer les différentes formes que prend la qualité de l'information (précision et fiabilité de la connaissance sur les UNAR) et les divers éléments qui peuvent nous permettre de la quantifier :
- De décrire les variations de la qualité de l'information selon l'intervalle temporel observé, et d'obtenir une première représentation synthétique de la base de données. Adopter une vision globale est à ce stade de l'étude indispensable étant donnés le nombre de données et leur hétérogénéité ;
- De choisir une période d'étude pertinente et « accessible » : afin de poursuivre les analyses, nous avons choisi de réduire notre champ temporel d'étude à l'intervalle le mieux pourvu en qualité et en quantité de données, quelle que soit la méthode de calcul considérée. Ses bornes temporelles sont ainsi - 3600 av. J.-C., et 1400 ap. J.-C. Ce choix nous a en outre semblé judicieux dans la mesure où il implique trois grands âges, la seconde moitié des Âges des Métaux (âges du Bronze et du Fer), l'Antiquité et la première moitié de la période Islamique, eux-mêmes découpés en diverses sous-périodes. Plusieurs hypothèses de fluctuation du peuplement et de changements dans l'occupation du sol entre ces diverses périodes ont été fréquemment émises, notamment sur la base de l'observation des variations de la quantité de données, c'est-à-dire, d'UNAR et de sites archéologiques découverts sur l'ensemble du territoire, ou des zones plus restreintes. Proposer une démarche permettant de questionner ces hypothèses à la lumière de la qualité des données sur lesquelles elles sont fondées prend ainsi tout son sens dans cet intervalle temporel.

La méthode et l'optique adoptées ont cependant abouti à une représentation privilégiant l'angle temporel: les variations de la qualité de l'information ont été observées sur l'ensemble de la chronologie de la base de données. Il s'agit désormais de renouer avec une vision spatio-temporelle et d'observer les variations de la qualité de l'information à la fois dans l'espace et dans le temps, en réduisant le champ à l'intervalle sélectionné au cours de cette étape.

La Figure 21 synthétise les apports de la première étape des traitements.

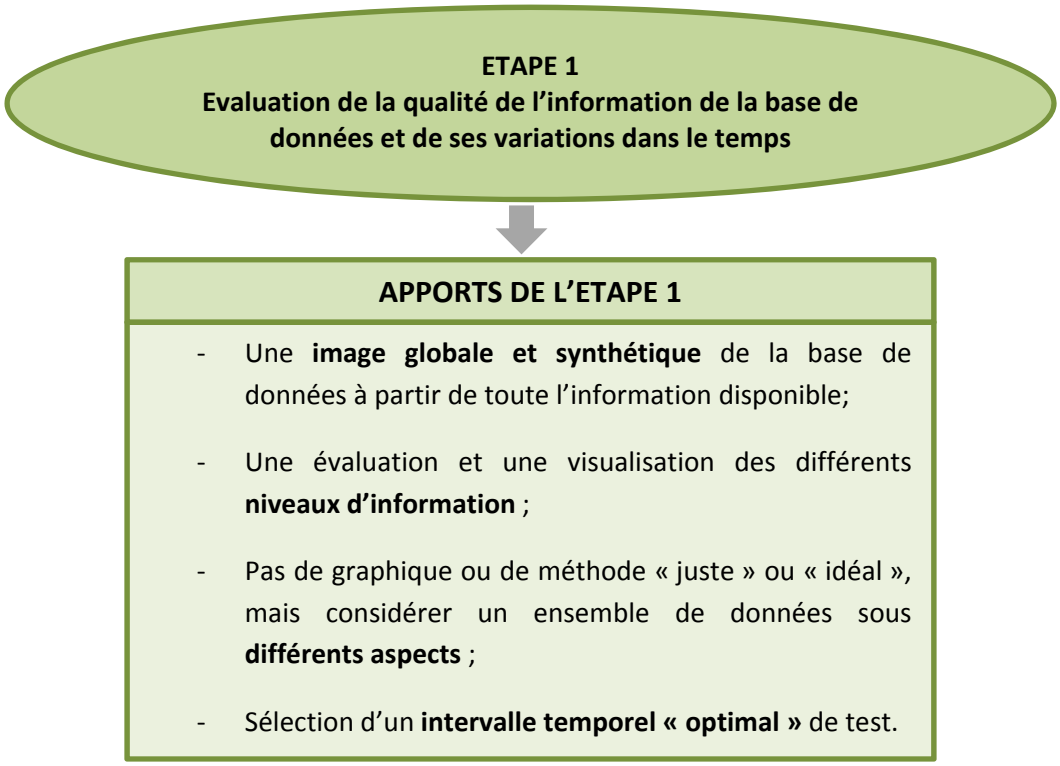


Figure 21 – Synthèse des apports de la première étape des traitements

Chapitre 5: Répartition spatio-temporelle des données et de la qualité de l'information ; l'apport de la géovisualisation

INTRODUCTION

Après avoir exploré et visualisé la base de données de manière globale, sous l'angle des variations de la qualité et de la quantité d'information selon les périodes qu'elle renseigne, et sélectionné une « période-test », il s'agit à présent de réintégrer la dimension spatiale jusqu'ici absente des analyses, et de visualiser la variabilité spatio-temporelle de cette information –toujours en termes de qualité et de quantité. Le postulat sous-jacent à la démarche est qu'au sein d'une même période (décrite par un seul niveau de précision et de fiabilité par l'AMC), la qualité et la quantité d'information varient spatialement –pas forcément dans le même sens-, ce qui n'est pas détecté par l'AMC. Nous rappelons que l'objectif de l'étape consiste non seulement à proposer une image claire de la base de données, mais aussi de sélectionner une zone géographique sur laquelle mener une étude plus fine des structures et des dynamiques spatio-temporelles du peuplement (entreprise difficilement réalisable, en termes de finesse de l'observation, sur une zone aussi vaste que celle couverte par la base de données, mais aussi difficilement justifiable à une telle échelle historiquement parlant).

En visualisant les phénomènes de continuité/discontinuité spatio-temporelles des UNAR et de la qualité de l'information qui les décrit, nous souhaitons notamment faire la part entre ce qui relève des artefacts créés par les fluctuations de la qualité de la donnée, ou par un découpage temporel pouvant biaiser notre approche du changement, et les phénomènes derrière lesquels se cache peut-être un véritable sens interprétatif.

La question qui s'est immédiatement posée fut donc celle du choix d'une unité de temps au niveau de laquelle nous pourrions représenter spatialement l'évolution des données. En effet, la diversité des niveaux de précision de la datation (quatre niveaux de périodes et sous-périodes) complexifie le procédé. Le choix est d'autant plus périlleux que l'évaluation du changement spatio-temporel est absolument dépendante du mode de répartition temporel des données. Cette étape de la recherche décrit les procédures qui sont à l'origine de ce choix, et les résultats qui en

sont issus en termes de visualisation spatio-temporelle de la variabilité de la quantité et de la qualité de l'information. La Figure 22 montre l'enchaînement des objectifs des deux premières étapes de cette étude.

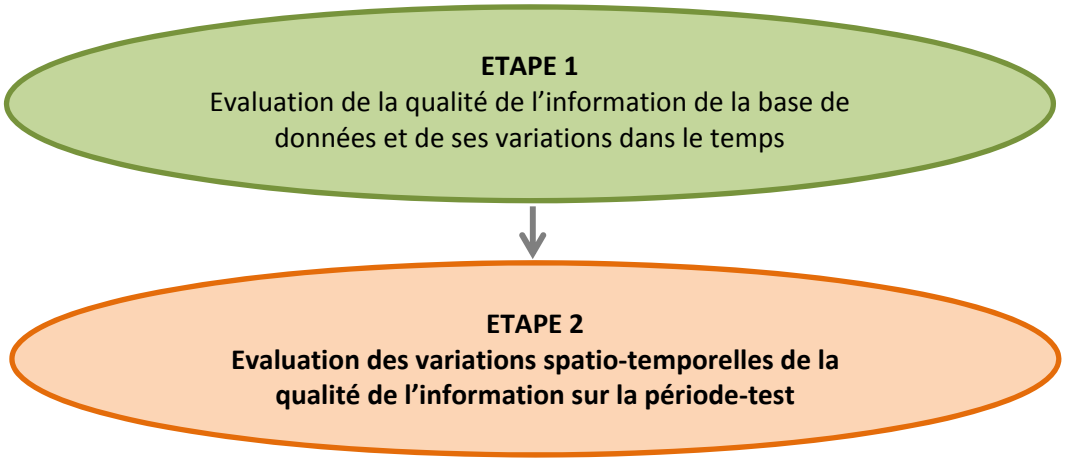


Figure 22 – Chaînage et objectifs des deux premières étapes de l'étude

1. REPARTITION SPATIO-TEMPORELLE DES UNAR

Nous avions choisi dans le chapitre précédent de raisonner en temps calendaire et de découper nos périodes d'étude en intervalles de 100 ans. Cette résolution sera ici conservée, et nous visualiserons le changement dans le nombre de données siècle en siècle.

Nous avons vu dans le chapitre 1 de la première partie que diverses méthodes de répartition temporelle des données ont été testées par les chercheurs qui se sont attelés à la question (Lawrence, 2012 ; Bevan et al., 2013 ; Favory, Nuninger, 2008). Une multitude de méthodes pourraient en fait être testées : cette répartition ne peut qu'être totalement artificielle, et relève d'un choix de l'analyste de composer entre ce qu'exprime la base de données -c'est-à-dire les éléments qui ont été collectés sur le terrain et au cours des recherches des archéologues- et les besoins de l'analyse spatiale.

Nous avons donc choisi d'effectuer cette opération en élaborant deux méthodes différentes mais complémentaires, c'est-à-dire chacune permettant d'accéder à un aspect différent de la relation entre les données. Les résultats issus de ces deux méthodes de répartition des UNAR dans le temps doivent donc être lus simultanément, afin de mettre en évidence les invariants dans le temps et l'espace, quelle que soit la méthode choisie, mais aussi d'identifier les artefacts. La comparaison entre ces deux méthodes permet également de s'affranchir de la comparaison à un modèle théorique pour effectuer cette répartition.

1.1 Méthode 1 : Répartition aléatoire des UNAR dans chaque intervalle de 100 ans.

La première méthode élaborée pour répartir les UNAR dans les intervalles de 100 ans consiste à effectuer un tirage aléatoire au sein de chaque période.

Nous nous intéressons tout d'abord aux périodes datées avec le plus de finesse, c'est-à-dire ayant la résolution temporelle la plus petite. Les UNAR associées à ces périodes sont réparties aléatoirement dans chacun des intervalles de 100 ans des périodes associées (Figure 23).

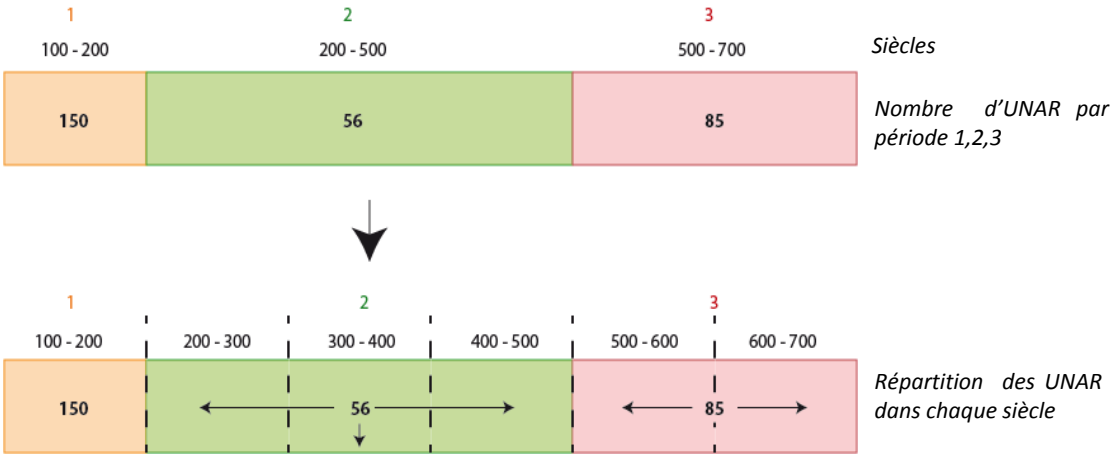


Figure 23- Répartition des UNAR des périodes 1, 2 et 3 de manière aléatoire dans chaque intervalle de 100 ans.

Ainsi, chacune des 56 UNAR de la période 2 sera attribuée indifféremment à l'un des trois intervalles de 100 ans de la période, et chacune des 85 UNAR de la période 3 sera attribuée à l'un des deux intervalles de la période 3. En effet, nous ne disposons d'aucune information permettant de déterminer si une UNAR a plus de chances de se situer dans tel ou tel intervalle de 100 ans de la période à laquelle elle est associée.

Certaines UNAR n'ont en revanche pu être datées aussi finement que dans le cas précédent. Elles sont donc associées à des périodes plus longues, recouvrant plusieurs sous-périodes. Dans ce cas, nous disposons donc d'une information supplémentaire : les UNAR de la sous-période recouvrant les autres seront attribuées de manière certes aléatoire au sein de la période, mais plus les sous-périodes associées comporteront d'UNAR, plus elles auront de chances de se situer dans ces intervalles de 100 ans (Figure 24).

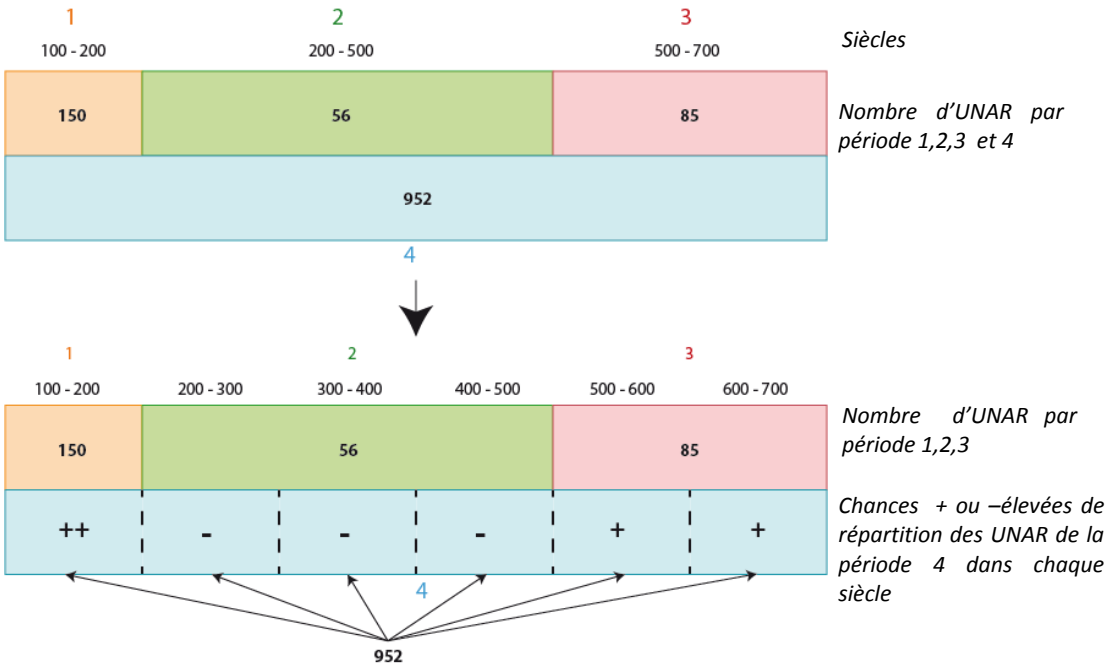


Figure 24 - Répartition des UNAR de la sous-période 4 en fonction du nombre d'UNAR des périodes 1, 2 et 3.

Ainsi, chacune des 952 UNAR de la période 4 aura plus de chances de se localiser dans le premier intervalle de 100 ans, un peu moins dans les deux derniers, et encore moins dans les second, troisième et quatrième intervalles.

Les UNAR présentes dans chaque intervalle de 100 ans sont par la suite sommées, afin de n'obtenir plus qu'un niveau de datation, c'est-à-dire un nombre d'UNAR pour chaque intervalle de 100 ans.

1.2 Méthode 2 : Répartition cumulative des UNAR dans chaque intervalle de 100 ans

Chaque UNAR est ici attribuée à chaque intervalle de 100 ans de la période à laquelle elle est associée (Figure 25). Ainsi, chaque UNAR apparaîtra plusieurs fois au cours de la période à laquelle elle est associée si celle-ci dure plus de 100 ans (par exemple : les périodes 2, 3 et 4).

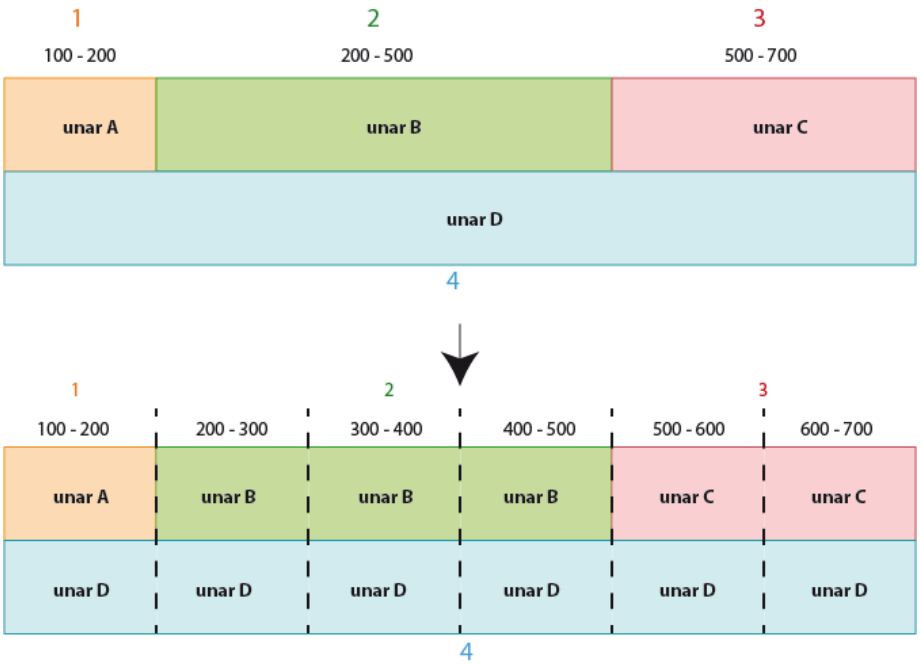


Figure 25 - Répartition des UNAR dans les intervalles de 100 ans selon la méthode 2

Les UNAR présentes dans chaque intervalle de 100 ans sont par la suite sommées, afin de n'obtenir plus qu'un niveau de datation, c'est-à-dire un nombre d'UNAR pour chaque intervalle de 100 ans.

On pourrait se demander pourquoi nous n'avons pas divisé le nombre d'UNAR par le nombre de tranches de 100 ans pour mieux les répartir dans la méthode 2. En fait, une telle répartition serait tout aussi artificielle que la nôtre, et la pondération qu'elle offrirait pourrait même introduire de graves erreurs.

Prenons par exemple un cas fictif comme suit :

1	2	3	4	5	6	7	8	9	*Tranches de 100 ans*
A 100		**B** 200							*Nombre total d'UNAR*
50	50	28	28	28	28	28	28	28	*Nombre d'UNAR par siècle*

Après un tel découpage, le rapport entre les périodes s'inverse : la période A, dont le nombre d'UNAR était plus faible, est désormais découpée en siècles présentant plus d'UNAR que la période B, qui en comportait un nombre plus élevé. Cela rend donc proportionnels la longueur de la période et le nombre d'UNAR, ce qui est, selon nous, un postulat extrêmement fort et injustifiable thématiquement.

La démarche que nous choisissons d'adopter est donc de conserver le nombre total d'UNAR par tranche de 100 ans, et de considérer la pondération des données en comparant cette méthode de répartition à la méthode 1, par tirage au sort, explicitée plus haut.

Cette problématique de la répartition temporelle des données peut s'assimiler à celle de l'estimation de leur répartition spatiale, que l'on rencontre plus fréquemment en géographie et en archéologie spatiale. Comprendre la répartition des données dans l'espace s'effectue le plus souvent par la comparaison à un modèle théorique, pouvant par exemple postuler l'homogénéité de la répartition des découvertes. C'est le choix effectué par l'équipe ArchaeDyn en élaborant les cartes de représentativité des zones étudiées : « Celles-ci permettent de comparer la densité des découvertes au sein d'un maillage régulier de la zone étudiée au nombre de points que recevrait chaque maille en cas d'homogénéité de la répartition des découvertes (valeur théorique = nombre de sites/nombre de mailles). Apparaissent ainsi des zones « sur-représentées » ou « sous représentées » qui peuvent, dans chacun des deux cas, s'expliquer par une réalité archéologique ou par des biais documentaires » (Favory, Nuninger, 2008). Cette entreprise s'avère possible notamment parce qu'elle est envisagée de manière statique et non dynamique : le modèle théorique, et donc la représentativité des phénomènes, n'est inhérent qu'à une période donnée (dans le cas de l'étude d'ArchaeDyn, l'âge du Bronze), et ne peut être utilisé pour percevoir le changement d'une période à l'autre.

Alors que notre problématique de répartition est ici spatio-temporelle, nous choisissons donc, à défaut de modèle théorique, de confronter et de prendre simultanément en considération deux méthodes complémentaires de répartition spatio-temporelle des données.

2. REPRESENTER LES VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DE LA QUALITE DE L'INFORMATION

Chaque UNAR, et les informations qui leur sont associées sont désormais attribuées à l'un -ou à plusieurs, dans la méthode 2 - des 50 intervalles de 100 ans qui constituent la période d'étude.

Pour visualiser l'évolution spatio-temporelle des UNAR, nous souhaitons y ajouter une troisième dimension : celle de l'incertitude associée aux données. L'objectif est de pouvoir visualiser simultanément la temporalité, la localisation spatiale et le degré de fiabilité de ces informations.

2.1 Choix de la résolution du maillage

Vu le nombre de données, et pour les besoins des traitements d'analyse spatiale, nous avons quadrillé la zone d'étude en mailles d'1 km², et également de 9 km². Ces deux mailles serviront de résolution pour les traitements et la visualisation : il ne s'agit donc pas ici de raisonner au niveau

de l'UNAR, mais de cellules d' 1 km², puis de 9 km², regroupant les informations des UNAR contenues. Le choix de ces deux dimensions de mailles est purement expérimental. Les mailles d'1km² ont été choisies avec les archéologues, cette taille étant suffisamment large pour obtenir une information lisible sur une carte et synthétique, mais pas trop pour ne pas englober des sites trop éloignés les uns des autres, dont le regroupement n'aurait aucun intérêt à ce stade de l'étude. Nous ne cherchons pas –encore- ici à faire apparaître des structures spatiales, mais à obtenir une information spatio-temporelle lisible, ainsi que la qualité de cette information.

Ainsi, le procédé décrit a tout d'abord été réalisé sur les mailles d'1km², puis nous avons choisi de tester une seconde résolution afin de voir en quoi la taille des mailles conditionne les résultats.

Chaque cellule se verra donc attribué un niveau de gris (de 0 à 255), relatif aux degrés de fiabilité temporelle, mais aussi bien entendu au nombre d'UNAR qu'elle contient. Le choix de caractériser l'incertitude sous forme d'un niveau de gris a été fait en prévision des analyses spatio-morphologiques (cf. partie I, chapitre 2) qui seront réalisées par la suite.

Le niveau de gris de chaque cellule a été calculé de deux manières différentes selon la méthode de répartition des UNAR dans le temps utilisée.

2.2 Calcul du niveau de fiabilité temporelle pour la méthode 1 de répartition des UNAR

Nous avons ici créé 5 classes synthétisant la qualité de la datation et de l'attribution chronologique (informations contenues dans la base de données) de chacune des UNAR : 5, 10, 15, 20, 25. Plus l'indice est élevé, plus la qualité de l'information temporelle de l'UNAR l'est aussi.

Cette information est ensuite sommée pour les UNAR contenues dans la même cellule d'1km², puis de 3 km², et nous obtenons ainsi le niveau de gris de la cellule (Figure 26).

Par exemple :

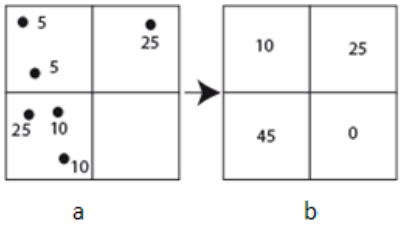


Figure 26 - calcul des niveaux de gris des mailles selon la méthode 1 : a) indice de qualité de la datation de chaque UNAR b) somme des indices et niveau de gris de chaque cellule

2.3 Calcul du niveau de fiabilité temporelle pour la méthode 2 de répartition des UNAR

Le niveau de gris de chaque cellule sera ici inhérent à la résolution de la datation plus qu'à sa fiabilité.

En effet, on considère que chaque UNAR possède une valeur maximale de niveaux de gris de 40 (le maximum d'UNAR qu'on peut trouver dans une maille étant de 6 → 6*40=240 : on ne dépasse pas les 255 niveaux de gris max par maille).

Cette valeur est divisée par le nombre d'intervalles de 100 ans auxquels l'UNAR est associée (Figure 27).

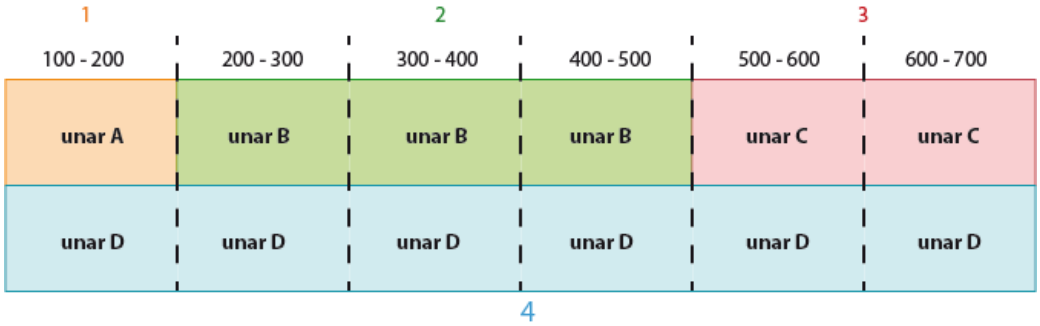


Figure 27 - Exemple de chronologie d'une cellule d'1 km²

Si la chronologie d'une cellule de 1 km² se décline comme sur cette figure, alors :

UNAR A: 40/1 = 40

UNAR B: 40/3 = 13

UNAR C: 40/2 = 20

UNAR D: 40/6 = 7

La cellule en question aura donc un niveau de gris de 40 + 7 = 47 pour le 1er intervalle de 100 ans, 13 + 7 = 20 pour les trois suivants, et enfin 20 + 7 = 27 pour les deux derniers.

Ainsi, si la méthode 1 est basée sur un critère de fiabilité de la datation, la méthode 2 relève plutôt d'une optique d'évaluation de la précision de la donnée temporelle : plus la résolution de la période associée à l'UNAR est fine, précise (donc courte) plus le niveau de gris de l'UNAR sera élevé.

3. PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

3.1 Présentation des cartes réalisées

Chaque intervalle de 100 ans fait l'objet d'une carte. Les niveaux de gris ont été ramenés à 9 classes de couleurs et les mailles agrandies (buffers de 2 km) afin de faciliter la visualisation des cartes.

Afin de faciliter la visualisation des variations de la qualité et de la quantité d'information de siècle en siècle, ainsi que la différenciation spatio-temporelle introduite par les deux méthodes de répartition des UNAR dans le temps, les cartes créées ont été mises en vidéo de façon à pouvoir visualiser le changement spatio-temporel siècle par siècle. Les animations réalisées sont en ligne sur le site scientifique d'archives ouvertes MédiHal, version d'Hal[13] spécifique au dépôt de médias.

Le lien permettant de visualiser les animations est le suivant :

https://medihal.archives-ouvertes.fr/medihal-01259664

La vidéo est tout d'abord composée de deux notes explicatives constituant un rappel des deux méthodes présentées ci-dessus pour la répartition spatio-temporelle des UNAR (cf. chapitre 5, point 1.) et d'attribution des niveaux de qualité de la datation (cf. chapitre 5, point 2.). Puis, les animations sont organisées sous forme de séquences, où chaque diapositive confronte deux cartes du même intervalle temporel :

La séquence 1 est destinée à visualiser les variations spatio-temporelles de la répartition de l'information selon les deux méthodes utilisées – ce qui permet de confronter les résultats obtenus en fonction des deux méthodes de répartition des UNAR (la

Figure 29 montre l'exemple du premier siècle de l'intervalle étudié).

- Les séquences 2 et 3 permettent respectivement de visualiser la répartition spatio-temporelle des UNAR en fonction des méthodes 1 et 2, ainsi que les niveaux de qualité de la datation -ce qui permet de garder à l'esprit l'impact du nombre d'UNAR sur le niveau qualité de la datation attribué à chacune des cellules de la maille (la Figure 28 montre l'exemple du premier siècle de l'intervalle étudié).

Les calculs des niveaux de qualité de la datation et du nombre d'UNAR par cellule ont été testés à partir de deux maillages différents, dont les cellules mesurent respectivement 1x1 km et 3x3 km.

[13] https://hal.archives-ouvertes.fr

La visualisation des phénomènes étant plus aisée et pertinente à partir de la maille 3x3 étant donnée l'échelle considérée (celle de la Syrie et du Liban dans leur intégralité), nous ne présentons que les cartes réalisées à partir de ce maillage.

Pour résumer, quatre formes de visualisation spatio-temporelle des données ont ainsi été élaborées :

- Méthode 1 : répartition aléatoire des UNAR dans les intervalles de 100 ans + fiabilité de la datation.
- Méthode 2 : répartition des UNAR dans chaque intervalle de 100 ans en fonction de la durée de la période associée (notion de précision de la datation).
- Densité d'UNAR dans chaque maille, en fonction de la répartition aléatoire → de 0 à 6 (une même UNAR ne peut donc tomber que dans un intervalle de 100 ans)
- Densité d'UNAR dans chaque maille, en fonction de l'attribution d'une même UNAR aux différents intervalles de 100 ans dans lesquels elle est représentée → de 0 à 6 (une même UNAR se retrouve dans plusieurs intervalles de 100 ans successifs si la période concernée dure plus de 100 ans).

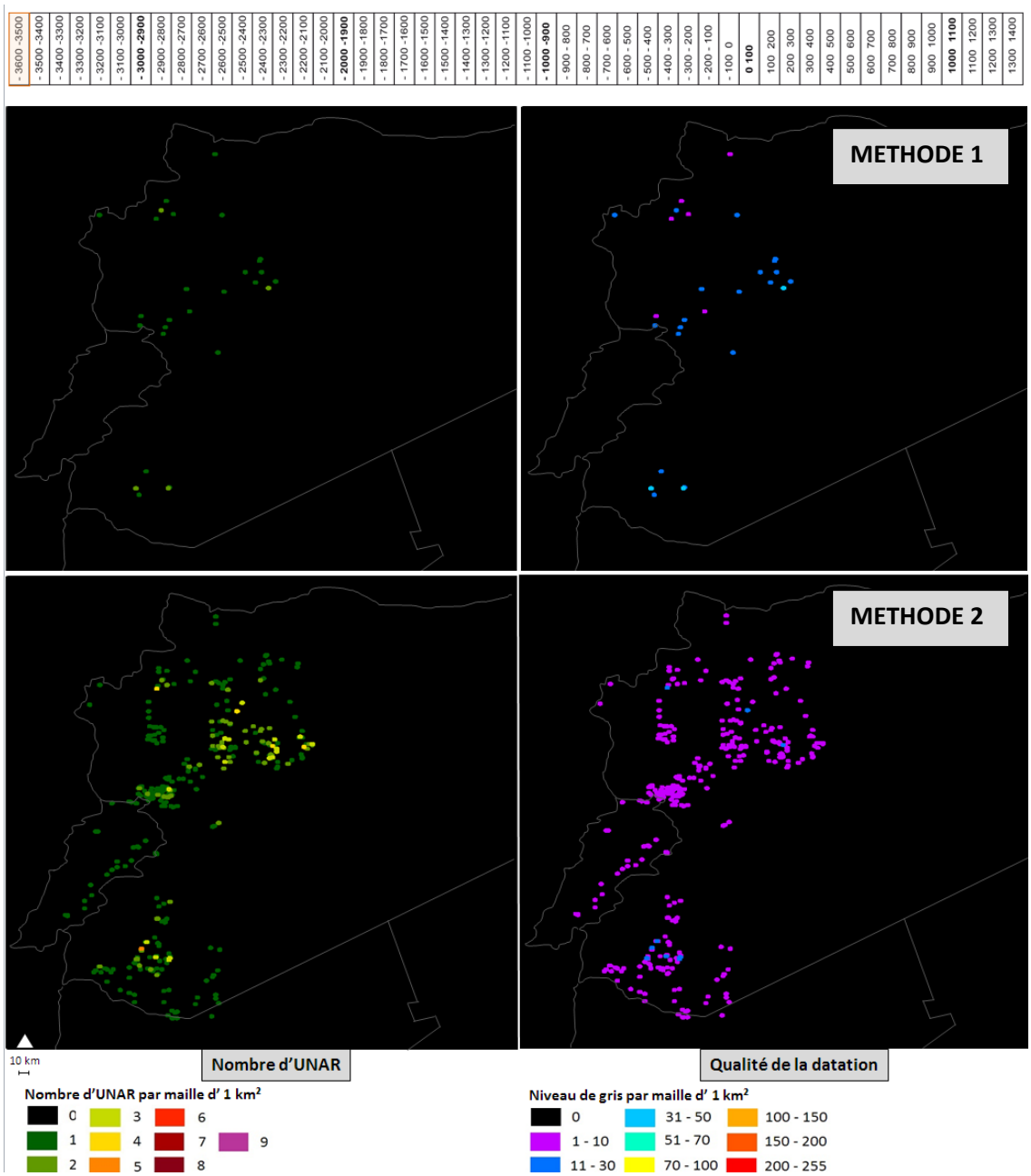


Figure 28 - Quantité d'information et niveau de fiabilité de la datation par mailles d'1 km² (ici agrandies pour la visualisation) pour l'intervalle temporel n°1 : méthodes 1 (en haut) et 2 (en bas)

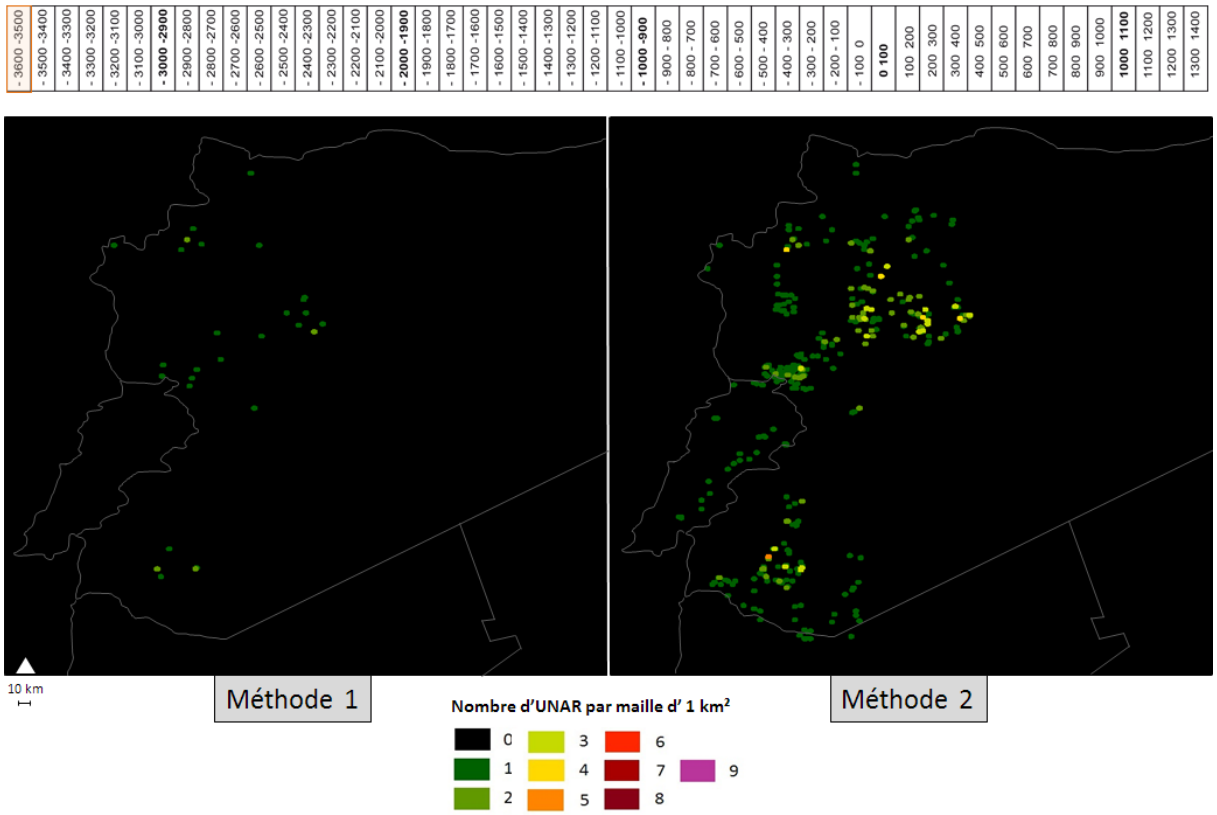


Figure 29 – Variations spatio-temporelles de la quantité d'information par mailles d'1 km² (ici agrandies pour la visualisation) pour l'intervalle temporel n°1 : comparaison des méthodes 1 et 2 de répartition des UNAR

3.2 Une cartographie « réflexive » et exploratoire : l'apport de la géovisualisation

La démarche mise en place dans cette seconde étape du raisonnement s'inscrit pleinement dans la démarche exploratoire, en ce qu'elle propose de visualiser un phénomène (la qualité de l'information) dans l'espace et dans le temps, non dans un but de présentation de résultats « réalistes » mais avec pour objectif d'alimenter le débat et les réflexions sur l'objet d'étude. L'objectif de cette phase, comme le décrivent Antoni et al. (2004), est de « rechercher des formes particulières, de mettre en évidence des anomalies, de faire apparaître des phénomènes non directement visibles, et d'identifier les structures sous-jacentes. La carte apparaît alors comme un outil révélateur de structures ».

La répartition des UNAR dans le temps par deux méthodes différentes permet de multiplier les vues. La cartographie proposée peut donc être assimilée à ce qu'Antoni et al. (2004) appellent une « cartographie réflexive », car l'objectif ici n'est donc « pas seulement de choisir une représentation parmi un ensemble de solutions. Il s'agit également de favoriser l'émergence

d'hypothèses concernant l'organisation spatiale sous-jacente à la carte «brute», au moyen de vues aux propriétés variées mais néanmoins connues » (Banos, 2001).

On peut ainsi qualifier cette stratégie de géovisualisation, définie par Aurélie Arnaud et Paule-Annick Davoine (2009) : « La géovisualisation se base sur un environnement animé, interactif et multimédia, appliqué à la cartographie et aux données géo-référencées, afin de découvrir de nouvelles relations, méthodes, hypothèses, cohérences imparfaites, *etc* ». Son intérêt dans un cadre spatio-temporel devient évident : « En redonnant de la dynamique, du rythme, aux structures géographiques, ce sont les processus sous-jacents que l'on se permet d'explorer. » (Banos, 2005). Les cartes et les animations réalisées matérialisent donc une étape particulière du raisonnement et de l'étude, et constituent autant d'intersections à partir desquelles l'utilisateur peut se questionner sur la ou les directions à explorer, et sur les moyens dont il dispose pour le faire : « la visualisation – physiquement passive mais cérébralement active – d'animations spatio-temporelles ne saurait constituer une fin en soi. Il s'agit également de permettre à l'utilisateur d'explorer, de tester et de vérifier toutes les idées qui ont pu émerger au cours de ce processus. » (Banos, 2005).

Plusieurs phases de « géovisualisation réflexive » seront menées tout au long de cette recherche. Nous considérons en effet chaque carte produite suite aux divers traitements non comme un résultat en soi, mais comme une étape comportant plusieurs panneaux indicatifs nous proposant divers chemins à emprunter. Au chercheur de choisir la piste qu'il souhaite emprunter, et les moyens qu'il se donne pour la parcourir… Et éventuellement –nécessairement ?- de revenir sur ses pas pour en expérimenter un autre. La boucle décrite sur la Figure 30 peut selon nous s'effectuer à volonté au cours d'une même recherche, le retour à une nouvelle exploration suite à la présentation des résultats « temporaires » pouvant être guidé soit par le public, par le chercheur lui-même ou ses collaborateurs dans un cadre transdisciplinaire, par exemple. C'est la dynamique qui a été mise en place au cours de cette recherche entre géographie et archéologie : des allers-retours constants entre les compétences développées dans ces deux disciplines ont été effectués ; la méthodologie, la théorie et les traitements relevant du champ de l'analyse spatiale (et mobilisés par une géographe), et l'interprétation des résultats et les nouvelles orientations thématiques qu'ils proposent ayant été guidés par les archéologues.

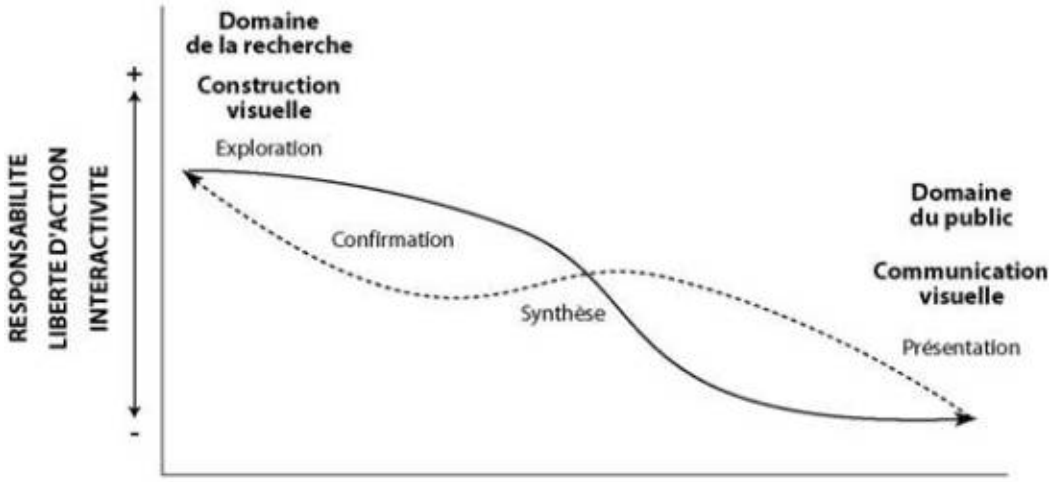


Figure 30 - De la construction à la communication visuelles (Antoni et al., 2003, d'après Cauvin (1996) et Dibiase (1990))

CONCLUSION : DISCUSSION SUR LA METHODE ET LES RESULTATS

Cette étape aborde la problématique de la répartition spatio-temporelle des données, et des répercussions que peut avoir ce choix méthodologique dans la visualisation- et *a fortiori*, l'analyse- des processus de changement.

Nous nous sommes donc ici directement heurtée aux biais et à la rigidité introduits par le découpage en périodes évoqués dans le chapitre 1 de cette étude : nous avons tenté de ramener les données associées à divers niveaux de précision et de fiabilité temporelle à une répartition siècle par siècle, alors même que la configuration « périodisée » de ces données rend la démarche artificielle et incertaine : en effet, concrètement et honnêtement, aucun élément ne peut véritablement nous permettre d'affirmer qu'une UNAR « appartient » à un siècle plutôt qu'à un autre au sein de la même période. Les méthodes de répartition qui ont été testées n'ont vocation qu'à proposer deux regards originaux sur la périodisation établie et sur la répartition spatiale des phénomènes qui y est associée.

Certes, la méthode 1 (aléatoire) disperse considérablement les phénomènes dans le temps, tandis que la méthode 2 (qui s'approche plus de la « réalité » suggérée par la périodisation) au contraire, les concentre et les fige. Considérées simultanément, les deux répartitions permettent cependant de se faire une première idée de la répartition spatio-temporelle des données, et de la variabilité spatio-temporelle de la qualité de l'information. On peut ainsi d'ores et déjà constater que le peuplement se rétracte et s'étend successivement au fil du temps (phénomène plus visible au travers de la méthode 2), mais on constate également que ces « pulsations » n'apparaissent pas

forcément simultanément sur les diverses zones de peuplement, et que certaines d'entre elles disparaissent parfois totalement et soudainement (c'est par exemple le cas pour les sites libanais entre 300 et 400 ap. J.-C.) pour réapparaître au siècle suivant (Figure 31). Ce phénomène était déjà matérialisé dans l'analyse multicritère par une chute brutale dans le nombre de données (Figure 18) au sein d'un palier où le peuplement atteint son maximum (durant l'Antiquité). Ces « bonds » spatio-temporels pointent en fait des artefacts causés par une erreur ou une lacune de typologie ou de saisie, et non au brusque effondrement -et à la toute aussi soudaine réapparition- de toute une zone de peuplement.

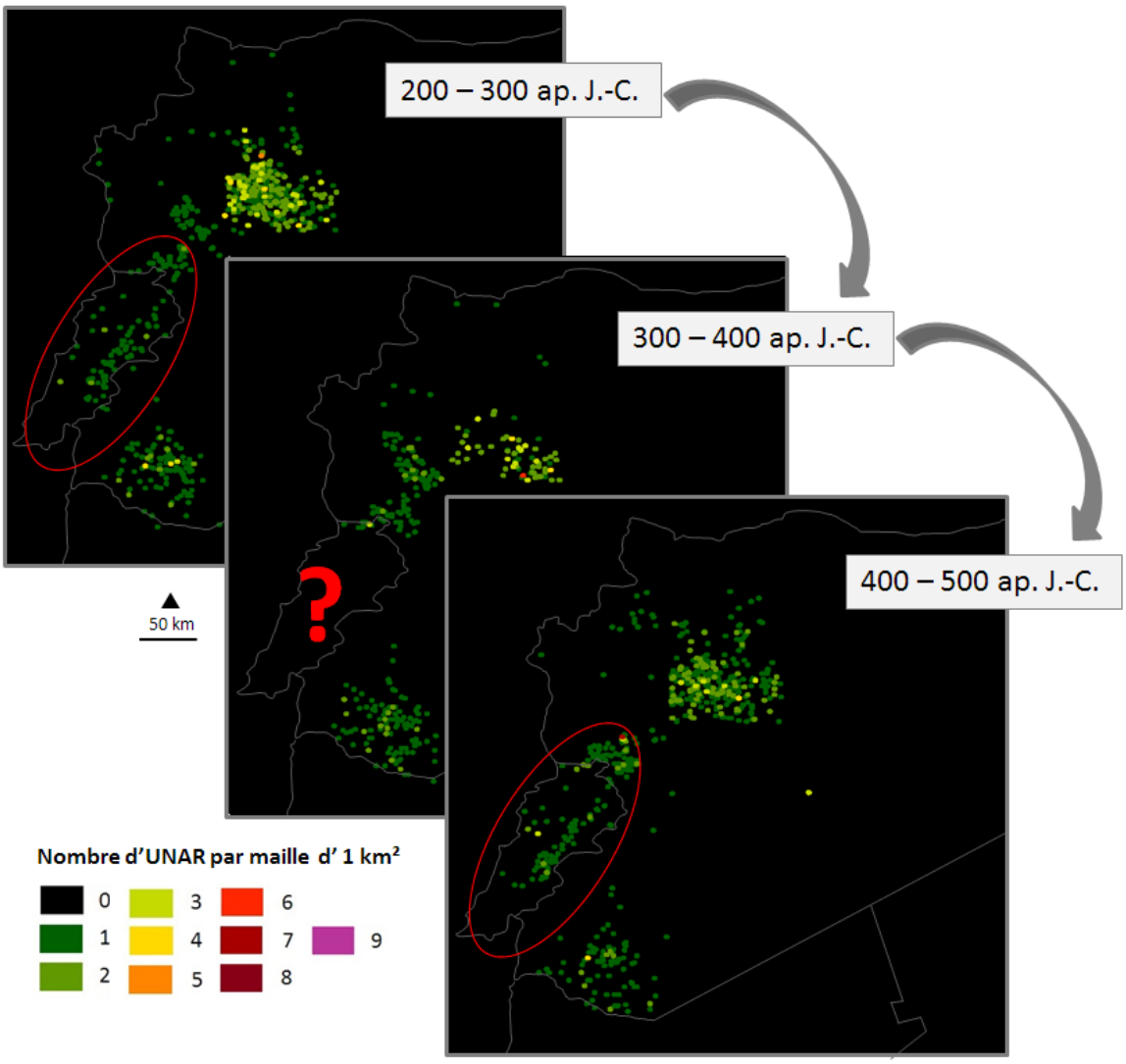


Figure 31 - Un exemple d'artefact soulevé par la géovisualisation (méthode 1 de répartition des données)

En outre, si la méthode 1 nous propose une répartition « erronée » dans le sens où elle estime comme contemporaines à l'échelle du siècle des UNAR qui ne l'étaient pas forcément -et *vice versa*- celle-ci nous permet tout de même d'aborder l'image de l'intensité du peuplement proposée

par la méthode 2 avec plus de recul et de pondération : la répartition temporelle des sites qu'offre la méthode 2 cumulant la totalité des sites de périodes parfois très longues, ce qui peut donner à l'observateur un sentiment d'extrêmes concentration et densité du peuplement, la méthode 1 harmonise la répartition, gomme certains effets de « masse » causés par la très longue durée de certaines périodes, nous donne une idée –certes vague spatialement mais sans doute plus proche de la « réalité » du peuplement en termes d'intensité à l'échelle du siècle -, et met d'autant plus en relief les périodes courtes où une concentration du peuplement « hors normes » apparaît sur certaines zones. A titre d'exemple, on constate sur la Figure 32 que la concentration des UNAR de -200 à -100 av. J.-C. ne semble pas forcément « sortir du lot » sur la totalité de l'information visualisée, si on la considère sous l'angle proposé par la méthode 2 (carte D); certaines concentrations (de -2300 à -2200 av. J.-C. par exemple) étant bien plus spectaculaires (carte C). Si l'on considère cependant la répartition proposée par la méthode 1, celle-ci met l'intervalle -200 -100 (carte B) en relief dans la mesure où sa très courte durée et le fort nombre de sites qui y est associé indique une véritable concentration du peuplement au Nord-Ouest de la Syrie. Au contraire, la dispersion proposée par la méthode 1 sur la carte A nous indique que la concentration au siècle -2300 -2200 ne doit son poids qu'à la durée de la période à laquelle elle correspond (300 ans).

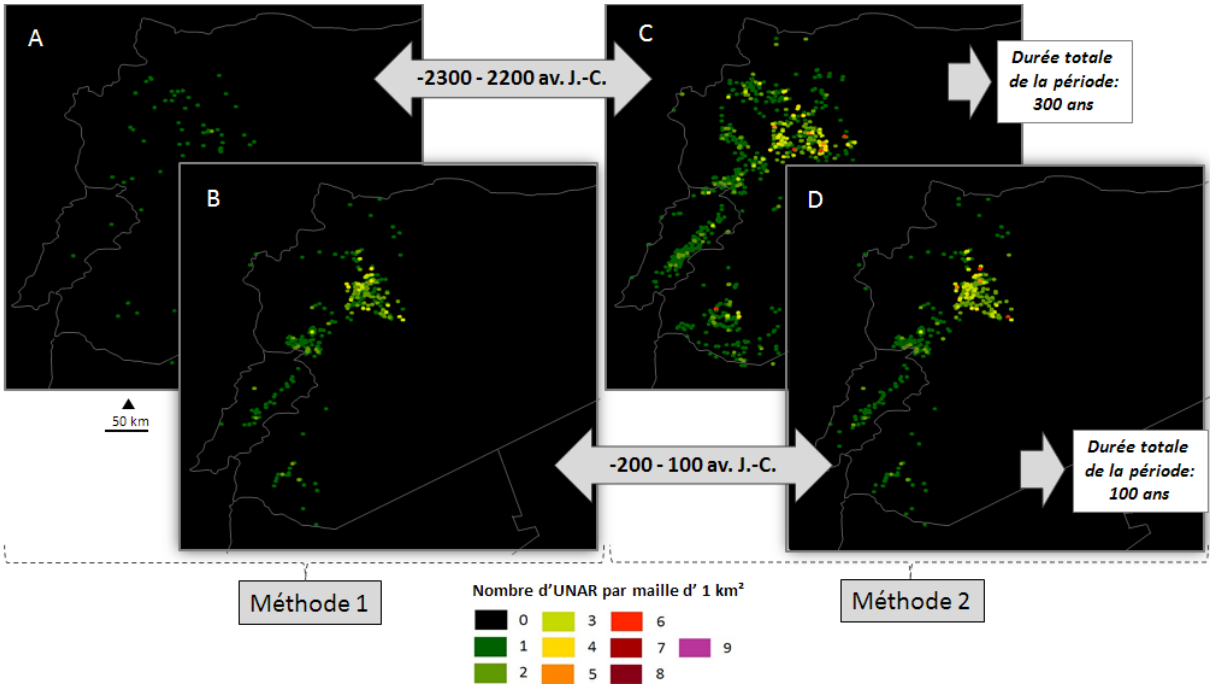


Figure 32 - Comparaison des concentrations du peuplement observées avec la méthode 2, à la lumière des concentrations mises en évidence aux mêmes siècles par la méthode 1

En outre, la méthode 1 permet, pour des périodes longues comme celle s'étalant de -3600 à -3100 de faire ressortir certains axes et alignements majeurs du peuplement (ici, un axe Sud-Ouest

Nord-Est, partant de la frontière Nord libanaise et s'étalant jusqu'au centre-Ouest de la Syrie) parfois noyés, dans la visualisation proposée par la méthode 2, dans la masse des données visualisées (Figure 33).

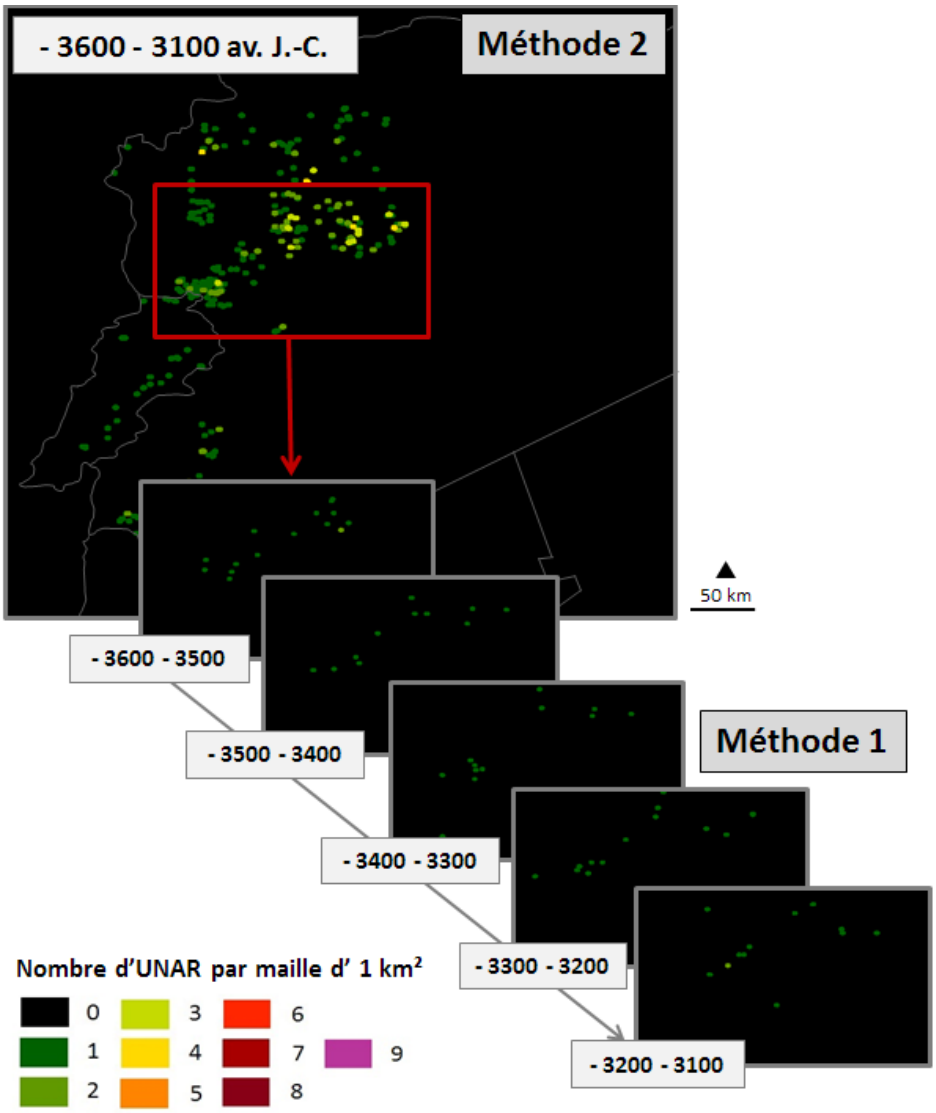


Figure 33 - Un première approche des alignements de structures et des zones de concentration de l'information

Cependant, notre objectif de sélection d'une zone géographique d'étude ne peut, à ce stade, pas être entièrement satisfait : la forte hétérogénéité spatio-temporelle de la quantité et de la qualité de l'information et des artefacts qui peuvent possiblement brouiller notre perception des phénomènes, nous conduit à pousser plus loin notre étude de la répartition spatio-temporelle des données et à chercher, tout comme nous venons de le faire pour la donnée temporelle à l'échelle du siècle, une méthode de régionalisation pouvant orienter avec plus de facilité, de précision et de pertinence notre choix d'une zone d'étude sur laquelle nous pourrons par la suite « zoomer » et

aborder des problématiques géographiques et archéologiques à une échelle plus locale. La Figure 34 synthétise les objectifs et les apports de la seconde étape des traitements.

ETAPE 2
Evaluation des variations spatiales de la qualité de l'information sur la période-test

↓

APPORTS DE L'ETAPE 2

- Passage de la périodisation de la chronologie initiale à une répartition des UNAR par siècle, selon deux méthodes :
  - **Méthode 1 :** répartition aléatoire;
  - **Méthode 2 :** répartition cumulée ;
- Quantification de la « qualité temporelle » de chaque UNAR;
- Visualisation de l'hétérogénéité spatio-temporelle de la quantité et la qualité de l'information par mailles d'1 et 9 km².

Figure 34 – Synthèse des apports de la seconde étape des traitements

Chapitre 6 : Exploration et identification des « unités spatio-temporelles significatives » ; méthode d'analyse spatio-morphologique exploratoire.

INTRODUCTION

L'étape précédente nous a montré que la qualité et la quantité d'information sont extrêmement hétérogènes dans l'espace et dans le temps - hétérogénéité elle-même fortement dépendante de la méthode de répartition des données choisie après la périodisation - et parfois brouillées par des artefacts qui biaisent notre perception des changements spatio-temporels dans le peuplement. Un besoin de régionalisation spatio-temporelle des phénomènes s'est ainsi imposé à nous, toujours dans une double optique de représentation plus claire de l'information –et de la comparabilité des zones de peuplement selon leur niveau de qualité et de quantité d'information- mais aussi toujours dans le but de choisir une zone géographique plus restreinte que celle abordée jusqu'ici. Il s'agit en fait de passer d'une régionalisation temporelle (répartition des UNAR par siècle par deux méthodes et points de vue différents) à une régionalisation spatio-temporelle des données.

Nous pourrions cependant choisir, comme c'est nous semble-t-il, le plus souvent le cas, une zone dont les « limites » spatiales sont définies par une mission archéologique particulière : nous sélectionnerions alors dans la base de données les UNAR associées à la mission de la « Syrie du Sud », ou des « Marges Arides », ou encore « Palmyrène ». Les structures et les dynamiques spatio-temporelles recherchées seraient dont extrêmement dépendantes des contingences de la délimitation d'une zone d'investigation de terrain - notamment administratives- ce qui pourrait considérablement biaiser notre perception des modes de peuplement. En effet, on observe sur les cartes élaborées précédemment que si l'aire totale est « découpée » en plusieurs missions, celles-ci couvrent cependant au total une bande assez continue du Nord-Ouest au Sud-Ouest de cette zone. Cette étape consiste à explorer par des méthodes morphologiques les structures spatio-temporelles qui se dégagent de la répartition des données à l'échelle de la totalité de la zone couverte par la base de données (et toujours sur le même intervalle temporel sélectionné suite à l'AMC) afin de tenter d'évaluer si les structures dégagées sont totalement et uniquement dépendantes des zones de prospection à l'échelle considérée, ou si une étude des structures et des

dynamiques spatio-temporelles du peuplement peut s'effectuer sur une zone révélée par une approche d'analyse spatiale et suggérant ainsi déjà la présence d'un phénomène spatio-temporel particulier à étudier plus finement. Nous proposons ainsi de « déconstruire » les niveaux spatio-temporels *a priori* « imposés » par des paramètres indépendants de la « réalité » que l'on cherche à retracer (ici, le zonage des missions archéologiques), en « reconstruisant » des niveaux selon nous plus appropriés pour une observation des phénomènes spatio-temporels et de l'incertitude qu'ils recèlent. La Figure 35 représente l'enchainement des objectifs des trois premières étapes de l'étude.

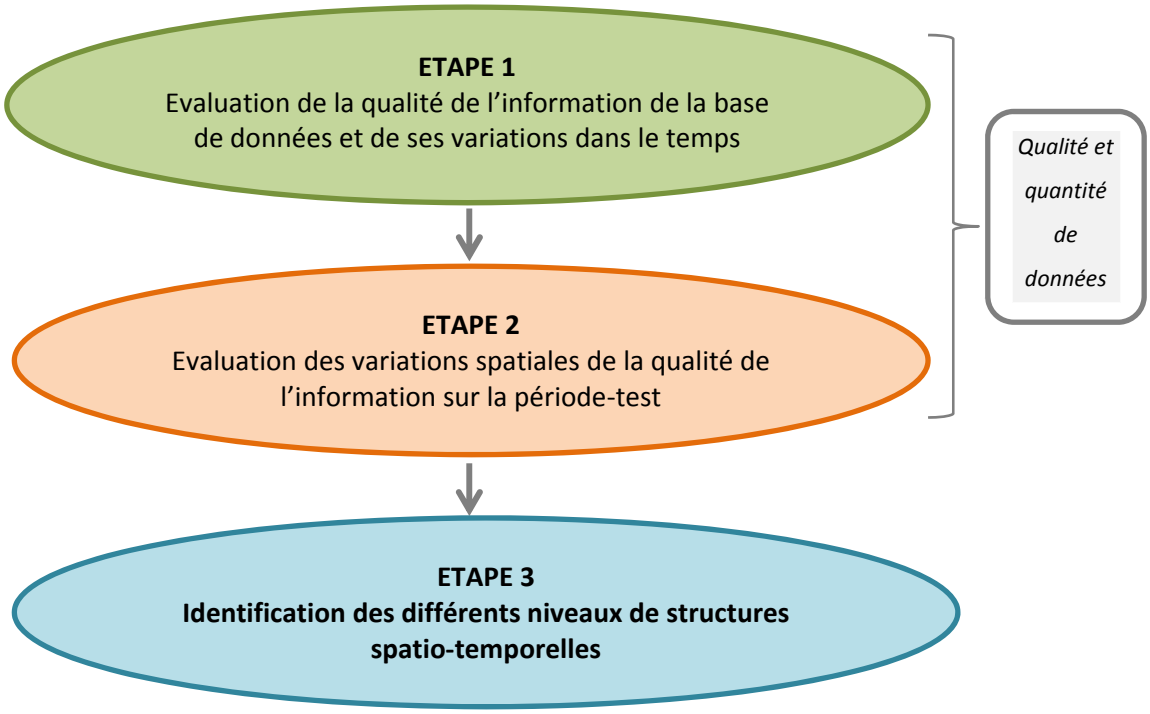


Figure 35 - Chaînage et objectifs des trois premières étapes de l'étude

1. LIMITES ET DISCONTINUITES SPATIO-TEMPORELLES

Nous pouvons mobiliser, à ce stade de l'étude, la remarque de Pierre Gentelle, qui écrivait en 1995 : « L'archéologie peut être conçue comme une discipline qui part d'échantillons (les « sites ») de territoires pour comprendre le fonctionnement passé, syn –ou dia- chronique, des sociétés humaines, mais qui n'a pas encore su maîtriser la question de la constitution d'unités spatiales significatives ». Cette observation est reprise en 2012 par Pierre Ouzoulias dans son retour sur l'expérience Archaeomedes, qui préconise de se défier de vouloir « définir des catégories universelles qui s'appliqueraient à toutes les situations, indépendamment des questions posées ».

Selon lui, la question de la définition des « unités spatiales significatives » ne prend un sens que pour « concevoir des objets adaptés à chaque problématique, et [de] déterminer les « unités spatiales » dans lesquelles ils pourraient être appréhendés avec le meilleur profit ».

Nous souhaitons ajouter quelques éléments à ces remarques, en nous appuyant sur la pensée de Christian Grataloup. Selon l'auteur, « les découpages spatiaux n'ont de pertinence que dans des limites chronologiques particulières - et réciproquement » (Grataloup, 2003). Il ajoute qu' « affronter la complexité, c'est considérer les discontinuités spatiales et les discontinuités temporelles des sociétés comme un seul problème. Pas plus de régions premières dans lesquelles se rangeraient des chronologies parallèles que de périodes générales applicables partout mais selon des rythmes régionaux différents ». Ces observations rejoignent les précédentes, mais y ajoutent la dimension temporelle omise par Pierre Gentelle et Pierre Ouzoulias. En proposant de penser « les régions du temps » (1991), et en prônant que « les périodes sont des régions » (2003) Christian Grataloup suggère de « discrétiser l'espace-temps en périodes spatiales, c'est-à-dire en périodes dont l'ordre de grandeur et les bornes sont fixés par l'évolution de l'organisation de l'espace, et non pas par des événements, par exemple politiques, sans rapport avec la dimension géographique de la société » (Volvey et al., 2005). Cette dernière phrase résume parfaitement la tâche que nous nous donnons dans cette partie de l'étude, consistant à rechercher par des méthodes d'analyse spatiale exploratoire ce que nous appelons en référence à l'expression de Pierre Gentelle des « unités spatio-temporelles significatives », pouvant s'exprimer à diverses échelles « emboîtées ». Le but est d'explorer et visualiser les dynamiques spatio-temporelles que matérialisent l'ensemble des données, afin de « trouver des articulations entre continuités et discontinuités, de façon à ne pas assimiler le changement spatial uniquement à des ruptures, et rompre également avec l'assimilation entre espace et inertie » (Elissalde, 2000). Il s'agit en fait d'une recherche de l'homogénéité spatio-temporelle que Jean-Bernard Racine et al. (1980) évoquent comme une nécessité : « Dans un ensemble composé d'éléments, hétérogènes quand on les prend un à un, le sujet doit découper des sous-ensembles qui maximisent l'homogénéité par rapport à sa problématique. Il faut passer de l'hétérogène à l'homogène soit de l'information à forte probabilité à l'information à faible probabilité. Le nombre de sous-ensembles étant énorme et certains n'ayant aucun intérêt par rapport à la problématique, il y a donc filtrage pour ne retenir que le pertinent ». Tout l'intérêt réside ainsi dans le choix entre ces méthodes de filtrage … qui selon Paul Claval (2002), doivent être variées : « La fonction d'une méthode de régionalisation, c'est de souligner, à partir des discontinuités territoriales qu'elle fait découvrir, un aspect d'une réalité complexe. C'est l'emploi simultané de plusieurs méthodes qui révèle la personnalité réelle de l'espace étudié, à travers le jeu des subdivisions que l'on peut y distinguer ».

2. MESURE DE LA DISTRIBUTION PAR LE NOMBRE DE CONNEXITES

2.1 Elaboration des courbes de connexités

C'est ici l'analyse d'images par morphologie mathématique (cf. partie I, chapitre 2) qui est mobilisée pour la recherche des structures spatio-temporelles : « la démarche consiste en effet à simplifier progressivement les images, ou plus exactement à les épurer, afin d'en faire naître de nouvelles, plus riches de significations. Au fur et à mesure des modifications, un tri structural s'opère, jusqu'à la mise en évidence d'une forme ou d'une structure caractéristique » (Voiron-Canicio, 1995). Les outils de morphologie mathématique que nous mobiliserons seront présentés au fur et à mesure de leurs utilisations (Figure 36).

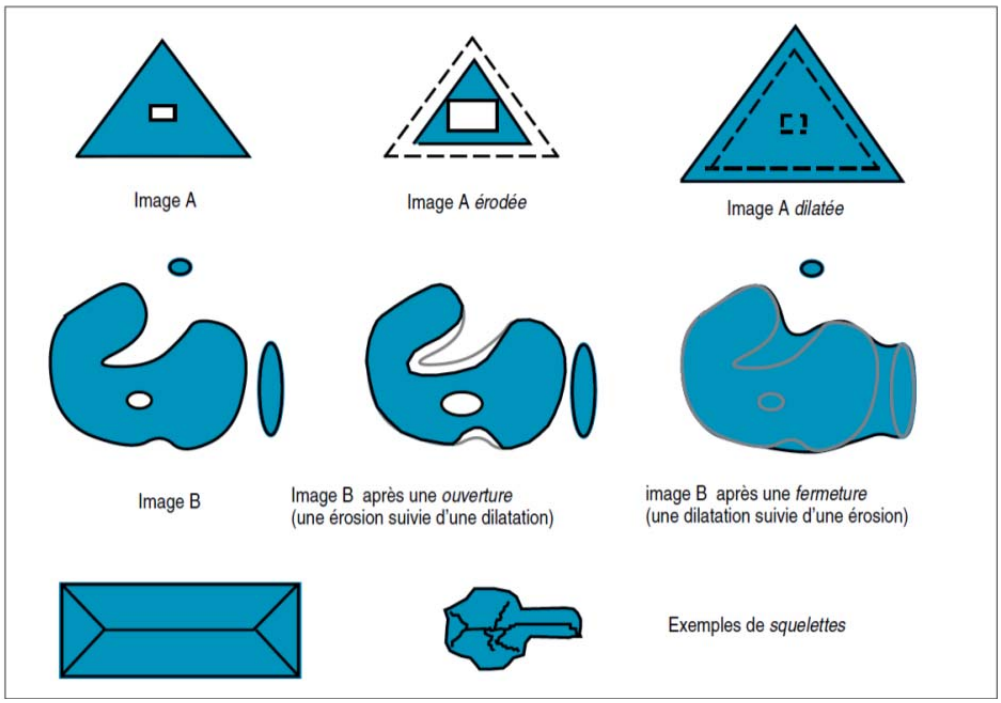


Figure 36 – Illustration des transformations de base de morphologie mathématique (Voiron-Canicio, 1995)

On effectue une série de dilatations de taille croissante sur l'ensemble des points (sites) à chaque intervalle de 100 ans (nommés A1 pour le premier intervalle, A2 pour le second, etc… pour la répartition selon la méthode 1, et T1, T2… pour la méthode 2), pour chacune des deux méthodes de répartition temporelle des sites (cf. Partie II, chapitre 5). Les points les plus proches se rejoignent en premier, puis à mesure que le pas de dilatation (donc la distance) augmente, des ensembles plus éloignés vont se connecter jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'une composante (Figure 37). A chaque pas de dilatation, on relève le nombre de connexités que l'on reporte sur une courbe (un exemple sur la Figure 38), qui nous renseigne sur l'espacement des points.

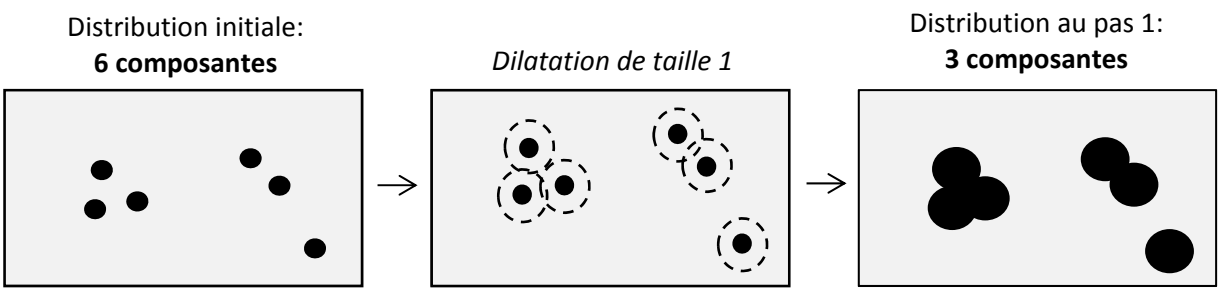


Figure 37 - Comptage du nombre de connexités par dilatations successives

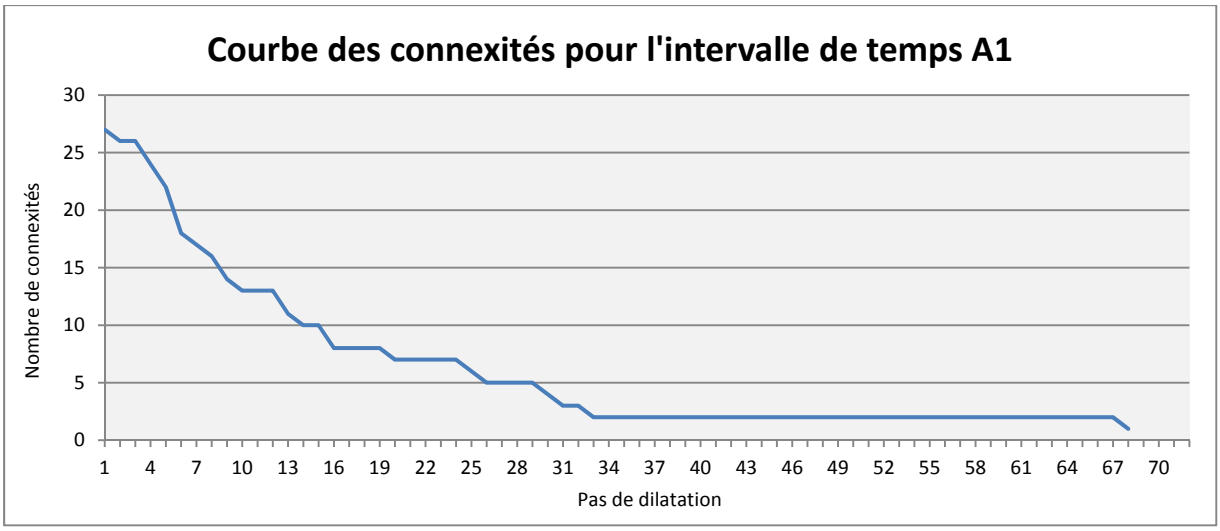


Figure 38 - Courbe du nombre de connexité du semis de sites compris dans l'intervalle temporel 1 (calculée à partir de la méthode 1 de répartition temporelle des sites).

2.2 Mise en évidence des organisations spatio-temporelles récurrentes par les courbes de connexités

Au vu des divers graphiques produits, force est de constater que des configurations spatiales similaires se retrouvent au fil des périodes. Afin de mettre en évidence ces organisations spatiales récurrentes et leurs temporalités, les graphiques sont tous comparés les uns avec les autres. Les courbes similaires voire identiques sont alors replacées sur un même graphique. Un exemple est donné sur la Figure 39.

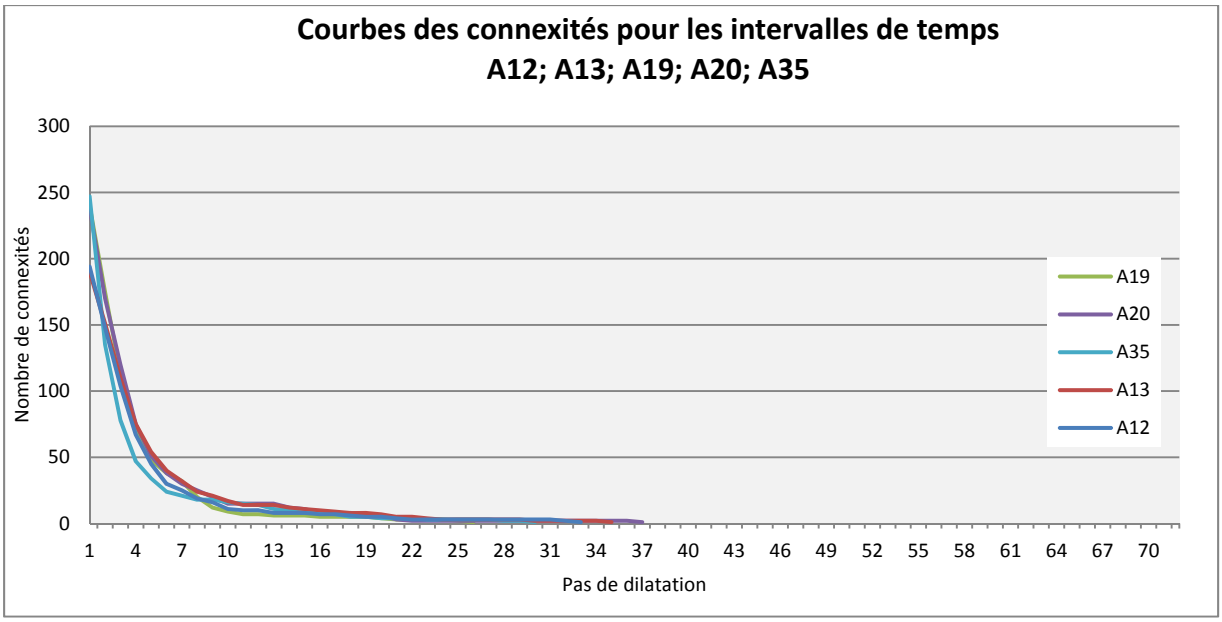


Figure 39 - Courbes du nombre de connexités des semis de sites compris dans les intervalles temporels 12, 13, 19, 20 et 35 (méthode 1 de répartition temporelle des sites)

2.3 Calcul de la courbe des distances moyennes entre les UNAR

Afin de visualiser l'information de manière plus synthétique, nous calculons la distance moyenne entre les points (division du nombre de connexités par le nombre initial de points) pour chaque intervalle de 100 ans, que nous replaçons sur une même courbe, pour chacune des deux méthodes de répartition temporelle des UNAR (Figure 40 pour la méthode 1, Figure 41 pour la méthode 2).

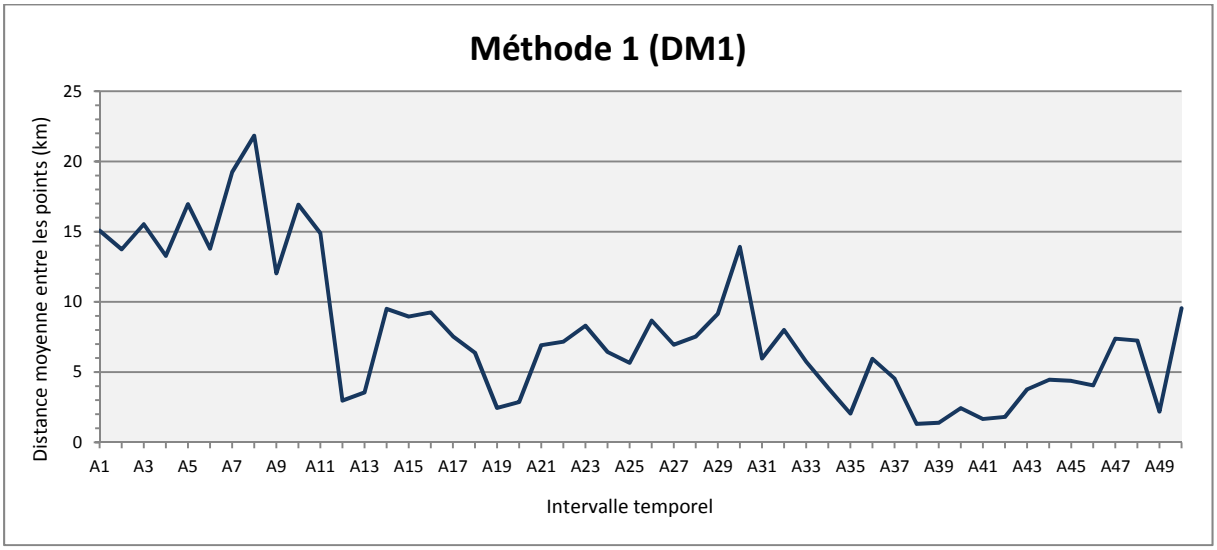


Figure 40 - Courbe représentant la distance moyenne entre les semis de points correspondant à chaque intervalle temporel étudié (méthode 1)

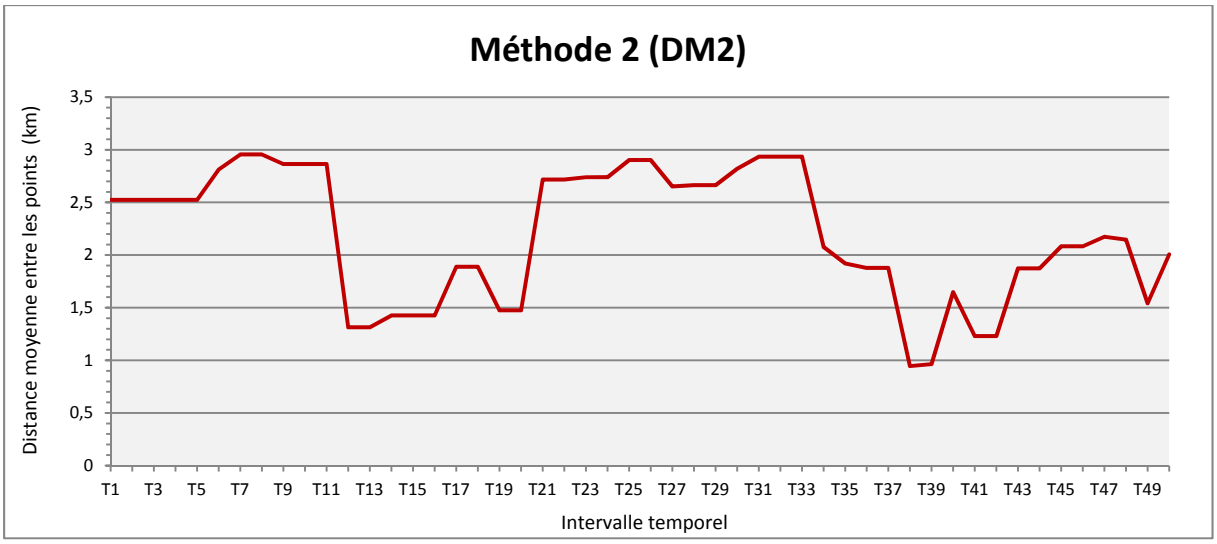


Figure 41 - Courbe représentant la distance moyenne entre les semis de points correspondant à chaque intervalle temporel étudié (méthode 2)

On constate à partir des courbes des distances moyennes que les tendances sont les mêmes quelle que soit la méthode choisie. La courbe 1 est plus accidentée, car les UNAR ont été réparties de manière aléatoire et on n'a donc pas deux périodes identiques comme dans la méthode 2, qui a plus de paliers.

On voit donc que l'espacement entre les sites semble fonctionner de manière extrêmement pulsatile, par grands paliers tout d'abord, à une échelle d'observation large, qui semblent aller au-delà des périodes identifiées : sur la courbe DM2, on a un premier palier de T1 à T11, puis de T12 à T20, de T21 à T33, et de T34 à T50.

- Le premier groupe concerne le Bronze Ancien I, II et III.
- Le 2e : Le Bronze ancien IV et le Bronze Moyen (I et II).
- Le 3e : le Bronze récent, et l'Âge du Fer (I, II et III).
- Le 4e : les périodes Hellénistique, Romaine et Islamique.

3. MISE EN EVIDENCE DES DIFFERENTS NIVEAUX DE CONFIGURATIONS SPATIO-TEMPORELLES

Les résultats obtenus précédemment sont alors synthétisés et replacés sur des schémas permettant de visualiser leur temporalité. Les intervalles temporels présentant des organisations spatiales récurrentes d'après les courbes de connexités sont ensuite figurés par des « boîtes » de couleurs identiques, et replacés sur les courbes des distances moyennes entre les points (Figure 42, Figure 43 et Figure 44).

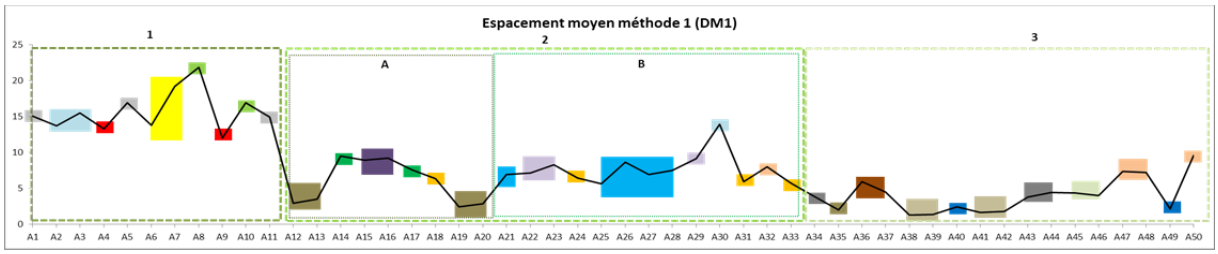


Figure 42 - Différents niveaux de configurations spatio-temporelles similaires (méthode 1)

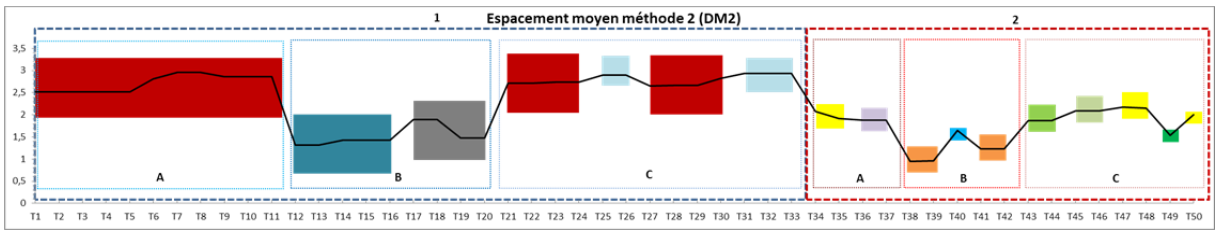


Figure 43 - Différents niveaux de configurations spatio-temporelles similaires (méthode 2)

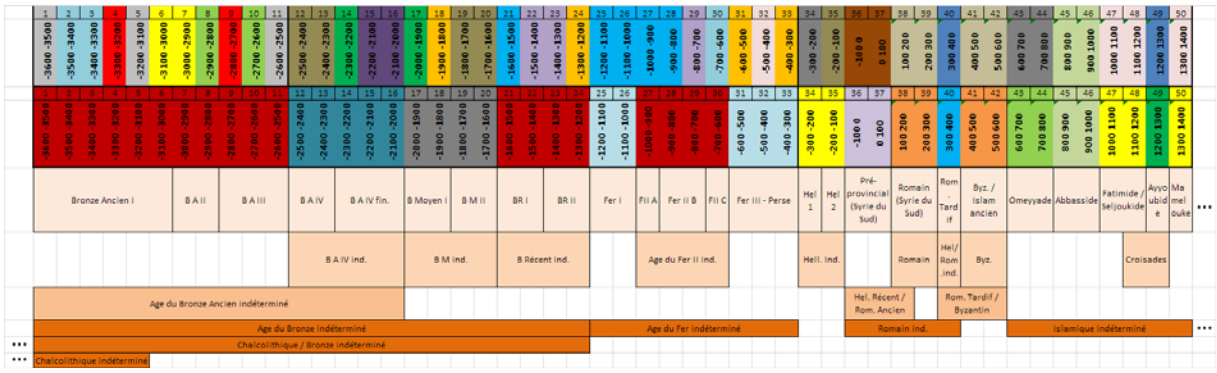


Figure 44 - Configurations spatio-temporelles similaires des méthodes 1 et 2 (les couleurs des «boîtes» illustrent les configurations similaires, indépendamment pour les méthodes 1 et 2) replacées sur la chronologie initiale de la base de données.

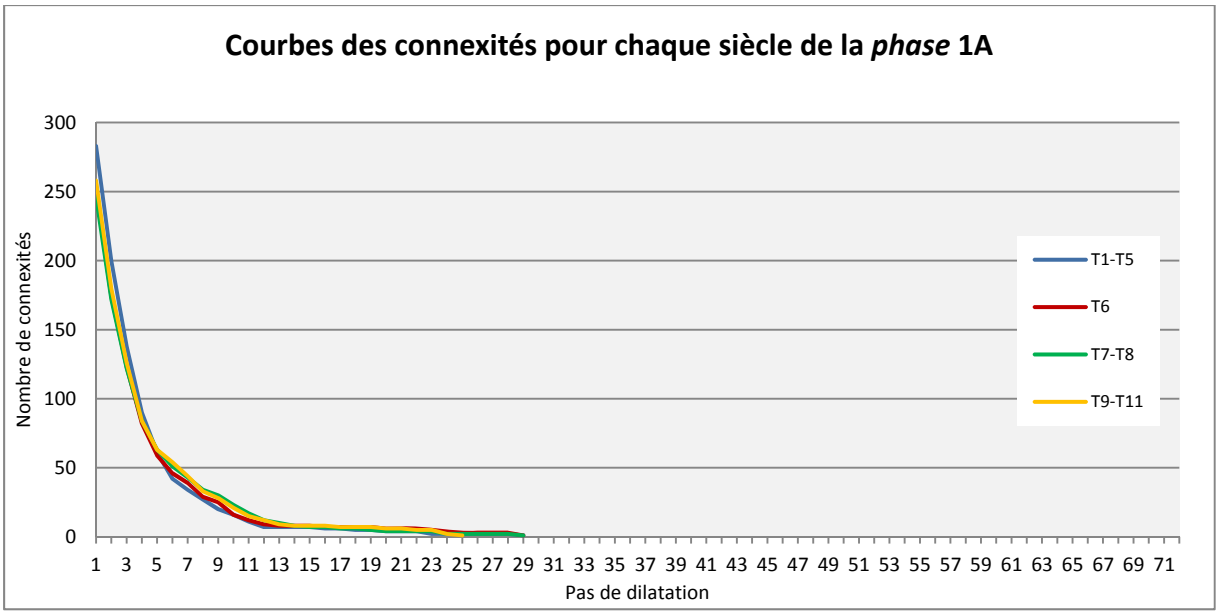


Figure 45 - Courbes des connexités de la première *phase* 1A identifiée sur la courbe des espacements moyens DM2 (Figure 43)

Les courbes des connexités obtenues à partir des données réparties selon la méthode 2 (Annexe 1) nous offrent plusieurs niveaux de structures. Ces niveaux seront comparés à la chronologie initiale par période, l'objectif étant d'évaluer ce qu'amène cette nouvelle conception spatio-temporelle de la répartition des sites archéologiques. Il ne s'agit donc pas de confirmer ou d'infirmer la périodisation initiale à partir de ces résultats –ni l'inverse, d'ailleurs- mais de discuter l'un et l'autre en y apportant un nouvel éclairage. En outre, afin de ne pas tout mélanger et parce-qu' à l'instar de Géraldine Djament-Tran et Christian Grataloup (2010) nous nous méfions du mot « période », nous avons préféré opter pour une terminologie différente : afin de distinguer les différents niveaux de structures spatio-temporelles, nous parlons des *phases* (1A, 1B, 1C, 2A…) et des *temps* (1Ba, 1Bb, 1Ca, 1Cb…). Un exemple de courbe des connexités des UNAR attribuées aux siècles correspondant à la *phase* 1A est donné sur la Figure 45. Les courbes de connexités correspondant aux phases suivantes sont données en Annexe 1.

La première *phase* (1A) (Figure 43) fonctionne par pulsations relativement longues, de 400 ans en moyenne (bien que la première dure 1100 années). La structure matérialisée par cette première pulsation est représentée par 250 à 300 sites archéologiques (Figure 45), dont environ 83% sont concentrés entre 1 et 5 km, avec un second palier entre 5 et 10 km (13% des sites), les 3% restants s'étalant sur 20 km. Cette première étape est matérialisée par une période de relative stabilité sur la courbe des distances moyennes (Figure 43), aux valeurs élevées, indiquant un espacement moyen des sites de 2,5 à 3 km, valeurs les plus élevées sur la totalité des siècles

étudiés. Cette première *phase* correspond à l'Âge du Bronze ancien I, II et III sur la chronologie initiale.

Une seconde *phase* (1B) de 900 ans est matérialisée sur la courbe DM2 (Figure 43) par une valeur basse, pouvant être interprétée comme une concentration du peuplement. Si l'on se réfère aux courbes des connexités, cette nouvelle configuration s'exprime en deux *temps* (ces *temps* correspondant à un nouveau niveau de structures identifiable sur le schéma): le premier *temps* (1Ba, avec une durée de 500 ans) est créé par un pic dans le nombre d'UNAR, qui double par rapport à la *phase* précédente (environ 600), et où le peuplement se concentre considérablement : 92% des sites distants de 1 à 5 km (Annexe 1). Les 8% restants sont répartis sur 24 km. La distinction d'un second *temps* (1Bb) d'une durée de 400 ans s'explique par une chute du nombre de sites (on descend à 380 sites pendant les 2 premiers siècles, puis on remonte à 480 au cours des deux suivants) mais toutefois le maintien de la configuration spatiale observée au *temps* 1Ba. La *phase* 1B regroupe le Bronze Ancien IV et le Bronze Ancien IV final (*temps* 1Ba), le *temps* 1Bb correspondant quant à lui à la totalité de l'Âge du Bronze Moyen (Bronze Moyen I et II).

La troisième *phase* de la période 1 (1C) est matérialisée sur la DM2 (Figure 43) par un long palier (1300 ans) de relative stabilité aux valeurs moyennes assez similaires à celles de la *phase* 1A. Cette similarité se retrouve également au niveau d'observation inférieur, matérialisé sur les courbes des connexités par un retour à la configuration spatiale observée à la *phase* 1A au cours des *temps* 1Ca et 1Cc, mais sur des durées plus courtes (400 ans chacune). Entre ces deux *temps* s'intercale un nouveau type de configuration spatiale occupant deux *temps* (1Cb et 1Cd) de 200 et 300 années respectivement, où le nombre de sites atteint son minimum (160 au total) et où le peuplement s'espace en s'étalant sur 35 km (contre 27 km aux *temps* 1Ca et 1Cc) (Annexe 1). Bien que cet allongement du palier final de la courbe des connexités suggère l'apparition d'un nombre infime de sites (environ 3) plus éloignés des autres au cours de ces *temps*, et malgré un nombre de sites plus faible (260 aux *temps* 1Ca et 1Cc, contre 180 aux *temps* 1Cb et 1Cd) aux *temps* 1Cb et 1Cd, l'homogénéité de la *phase* 1C est assurée somme toute par une répartition spatiale des sites assez similaire (cf. courbes des connexités). La *phase* C regroupe l'âge du Bronze Récent et l'Âge du Fer, avec le Bronze récent I et II pour le *temps* 1Ca, et le Fer II A, B et C pour le *temps* 1Cc (ces deux *temps* étant analogues), et les Âges du Fer I et III pour les *temps* analogues 1Cb et 1Cd.

Dès la fin de la *phase* 1C, la courbe DM2 (Figure 43) change d'allure : celle-ci semble reprendre la structure pulsatile en trois *temps* identifiée précédemment par la succession des *phases* A, B et C, mais sur des durées beaucoup plus courtes, et avec des configurations spatiales plus diversifiées (7 au total sur 1700 ans, contre 4 sur 3300 ans pour la *phase* 1).

La *phase* 2A se manifeste par une configuration spatiale impliquant environ 250 sites, espacés de 2 km en moyenne (Annexe 1). 94 % des sites sont répartis entre 1 et 5 km. La différenciation entre les *temps* 2Aa et 2Ab, de 200 ans chacun, est introduite par le sort des 6% restants, qui dans le premier cas, se répartissent sur 6 à 30 km, et dans le second, entre 5 et 52 km. La courbe des espacements moyens demeurant cependant relativement stable (Figure 43), il se pourrait que l'apparition de très peu de sites mais très distants des autres soit à l'origine de cette différence.

Le passage à une nouvelle *phase* 2B est introduit par un resserrement du peuplement et une augmentation brutale du nombre de sites (phénomène que l'on avait déjà observé à la *phase* 1B), qui atteint son maximum au *temps* 2Ba (760 UNAR) (Annexe 1). Cette *phase* de 500 ans aurait pu n'être constituée que d'un seul *temps*, les 200 premières années (2Ba) et les 200 dernières (2Bc) présentant des configurations spatiales presque identiques sur les courbes des connexités : un nombre d'UNAR oscillant entre 760 (2Ba) et 660 (2Bc), dont 93% sont distantes de 1 à 4 km, les 7% restants s'étalant sur 27 km (Annexe 1). Cependant, le troisième siècle de la *phase* introduit une différenciation considérable et une rupture dans la continuité évoquée, par une chute brutale du nombre de sites qui passe à 380. Cette dynamique a été marquée par l'introduction d'un *temps* 2Bb (Figure 43). Malgré cette chute dans le nombre d'UNAR, les courbes des connexités montrent cependant le maintien d'une répartition spatiale des sites identique entre les *temps* 2Ba, 2Bb et 2Bc (Annexe 1).

La *phase* 2C de 800 ans, plus longue que les deux précédentes voit se succéder cinq *temps*, les trois premiers de 200 ans chacun, puis deux derniers de 100 ans chacun (Figure 43). Malgré une répartition spatiale presque identique des sites entre 1 et 30 km pour chacun de ces cinq *temps*, des différences ayant motivé ce découpage sont notables (Annexe 1): Au cours du *temps* 2Ca, le nombre de sites (pourtant au total de 680 au *temps* 2Bc, à la *phase* précédente) baisse à 430. 88% d'entre eux sont distants d'1 à 5 km, les 12% restants se répartissant sur 6 à 42 km. Au *temps* 2Cb, le nombre d'UNAR baisse sensiblement (380), mais si 86% se répartissent, comme au *temps* 2Ca, sur 5 km, la distance maximale des 14% restants atteint 71 km. On suppose, là encore, l'apparition de très peu de sites à des distances considérables des concentrations plus récurrentes. Le passage au *temps* 2Cc marque le retour à une configuration spatiale identifiée plus tôt, lors de la *phase* 2Aa, avec un total de 300 sites en moyenne, 94% d'entre eux étant distants d'1 à 5 km, et les 6% restants de 6 à 30 km. Ce *temps* de 200 ans se matérialise également dans le dernier siècle étudié, le *temps* 2Ce. La discontinuité entre les *temps* 2Cc et 2Ce est introduite par un *temps* intermédiaire (2Cd) d'un siècle matérialisé par une forte augmentation du nombre d'UNAR (520 au total) mais dont la répartition est similaire à celle des *temps* précédents.

Plusieurs niveaux de structures et d'observation des phénomènes ont ainsi été identifiés, du plus large au plus fin :

Un niveau séparant en deux grandes zones les 33 premiers siècles étudiés (zone 1 sur le schéma) des 17 derniers (zone 2), c'est-à-dire si l'on se reporte à la périodisation initiale, les Âges du Bronze et du Fer (-3600 à -300), et les périodes historiques (-300 à 1400). En effet, nous avons vu que la courbe DM2 (Figure 43) change d'allure en passant de la zone 1 à la zone 2 : celle-ci reprend le rythme en trois *temps* identifiée précédemment par la succession des *phases* 1A, 1B et 1C, mais sur des durées beaucoup plus courtes, et avec des configurations spatiales plus diversifiées. En outre, il est intéressant de noter que les configurations spatiales identifiées par les courbes de connexités sont bien différentes de la zone 1 à la zone 2, dans la mesure où aucun des *temps* identifiés dans une zone ne se retrouve dans l'autre.

Les *temps* analogues (1A, 1Ca et 1Cb ; 1Cb et 1Cd ; 2Aa, 2Cc et 2Ce, 2Ba et 2Bc) introduisent un niveau d'observation discontinu dans le temps, ces intervalles temporels ne se succédant pas. Ce niveau d'observation est inférieur à celui des zones, car comme nous l'avons évoqué précédemment, les *temps* analogues ne le sont qu'au sein de la zone à laquelle ils appartiennent.

Les *phases* (A, B, C) ;

Les *temps* (Aa, Ab, Ac…) qui se succèdent pour constituer les *phases* ;

En outre on constate, dans un esprit très synthétique, que la majorité (90% en moyenne) des UNAR sont espacées d'une distance d'environ 5 km, tandis que les 10% restants sont étalés dans l'espace entre 10 et 70 km (Annexe 1). Leur répartition s'effectue ainsi très certainement sous forme de concentrations, avec une présence souvent temporaire d'un faible nombre UNAR très éloignées de ces concentrations.

Si l'on compare les répartitions spatio-temporelles commentées à partir de la méthode 2 de répartition des UNAR avec celles de la méthode 1, on constate que la méthode 1 donne une courbe des distances moyennes (Figure 42) bien plus hétérogène : contrairement à la méthode 2 (Figure 43), chaque tranche de 100 ans est unique, une UNAR ayant été attribuée aléatoirement à une tranche de 100 ans ne pouvant se retrouver dans un autre intervalle. On observe donc moins de paliers que sur la courbe DM2. Le nombre d'UNAR total pour chaque tranche de 100 ans est donc également moins élevé que dans la méthode de répartition 1. Il est toutefois intéressant de noter que si l'espacement entre les sites est de façon générale beaucoup plus fort, phénomène certainement dû au nombre d'UNAR moins élevé pour chaque siècle, on observe sur les courbes

des connexités que la majorité des sites est espacée, comme pour la méthode 2 de répartition, dans les 7 premiers kilomètres. Le fait que ces concentrations se détectent également par la méthode de répartition aléatoire peut nous faire supposer un ancrage spatio-temporel fort de grandes structures, et la présence d'autres structures « satellites », plus fluctuantes gravitant entre 10 et 70 km autour des premières structures.

En outre, si la courbe DM1 (Figure 42) est bien plus hétérogène que la DM2 (Figure 43), il est intéressant (et rassurant !) de constater que sa tendance est similaire : les grandes *phases* identifiées précédemment se retrouvent, certes de manière moins flagrante, mais tout de même présente. On peut en outre constater que la zone 2 identifiée à partir des courbes de la méthode 2 est en tout point identique à celle identifiée à partir de la méthode 1. Ce phénomène peut être attribué au fait que la durée des périodes de la chronologie initiale raccourcissant -ou la précision augmentant- pour les périodes historiques, la répartition aléatoire des UNAR s'est effectuée sur des intervalles temporels bien plus courts, de 100 à 200 ans, ayant conservé dans une certaine mesure la proportion initiale.

Ce cheminement nous a ainsi permis d'obtenir une première vision des divers niveaux de structures spatio-temporelles identifiables à partir de la totalité des données et sur 50 siècles, à partir de deux méthodes de répartition temporelle des unités archéologiques. Plusieurs constats et questionnements ressortent de ces observations.

En effet, une complémentarité entre les deux méthodes de répartition semble ici s'amorcer : la méthode 1 permet de s'éloigner quelque peu du conditionnement introduit par la périodisation de la chronologie initiale, contrairement à la méthode 2, plus « fidèle » à la répartition des archéologues et plus homogène. La comparaison des courbes réalisées selon ces deux méthodes de répartition nous a montré que les concentrations d'UNAR semblaient avoir un « ancrage » spatio-temporel différent, avec des « noyaux » resserrés, et des « satellites » plus fluctuants.

La Figure 46 propose une synthèse du raisonnement et des traitements réalisés au cours de cette étape.

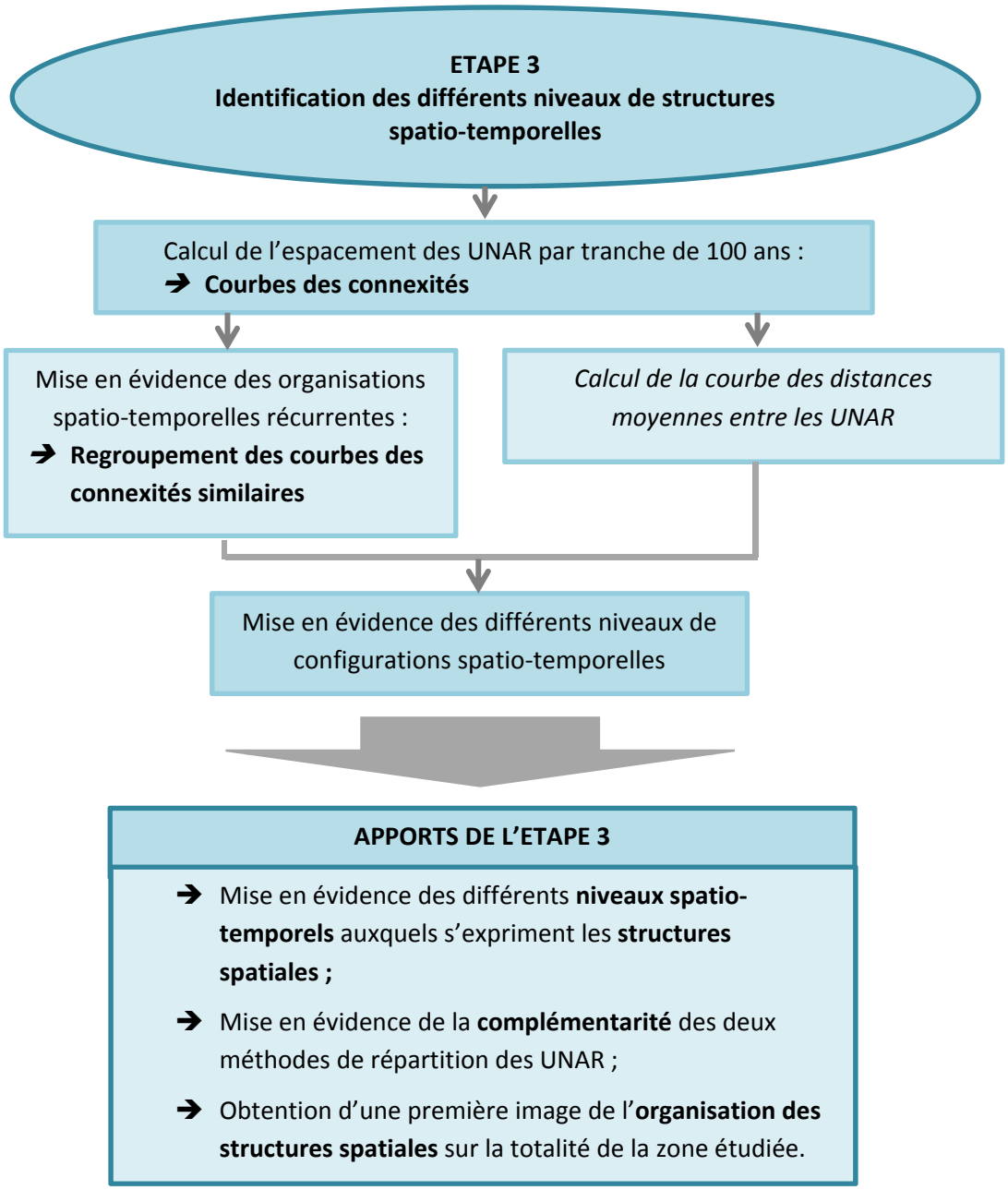


Figure 46 - Synthèse des opérations et des apports de la troisième étape des traitements

Les questions qui se posent à cette étape des traitements sont ainsi :

- d'observer si ces phénomènes existent bel et bien, et sont véritablement identifiables morphologiquement,
- si cette structure en « noyaux » et en « satellites » se maintient dans le temps avec la même localisation. En d'autres termes, si les outils utilisés nous ont permis de supposer l'existence récurrente d'une telle structure spatio-temporelle, rien ne nous affirme que celle-ci ne se déplace pas dans l'espace tout en maintenant sa forme.

En outre, nous avons identifié dans la zone 2 un raccourcissement de la durée des temps et des phases identifiés, au même titre que la reproduction de la structure pulsatile identifiée en zone 1, mais sur une durée beaucoup plus courte. S'agit-il ici d'une « accélération » des rythmes temporels à mesure que l'Histoire avance, ou bien d'une augmentation de la précision et de la fiabilité dans la datation des objets archéologiques plus récents ?

Il pourrait également être intéressant de visualiser la possibilité que les niveaux de structures identifiés (en zones, en *phases* et en *temps*) ainsi que leurs rythmes se retrouvent dans la morphologie des structures spatiales.

Tenter de répondre à ces questionnements et progresser dans notre exploration de la base de données, et des rythmes spatio-temporels qu'elle recèle nécessite ainsi de passer à une analyse spatiale morphologique, afin de visualiser les distributions non plus sur des graphiques mais dans l'espace (Figure 47).

4. VISUALISATION DES DISTRIBUTIONS ET DE LEURS STRUCTURES SPATIO-TEMPORELLES

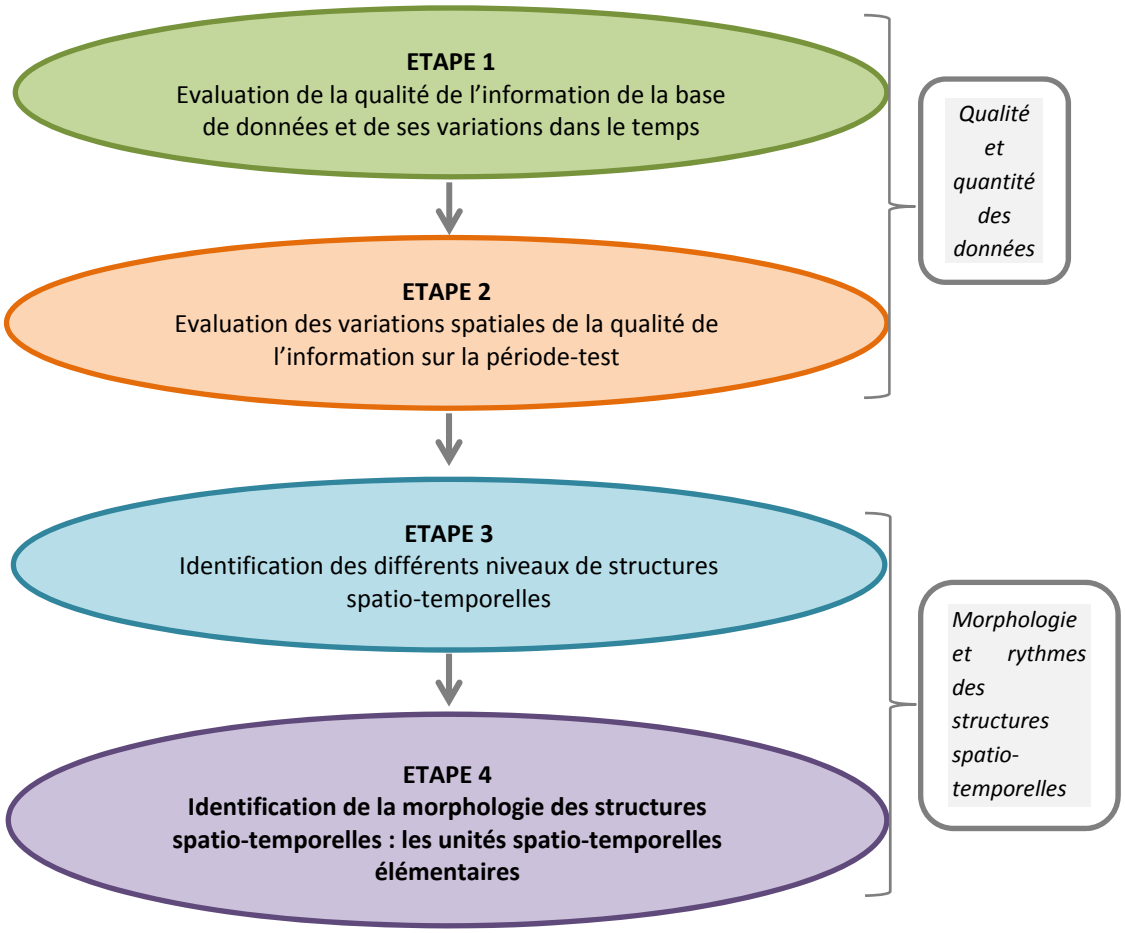


Figure 47 - Chaînage et objectifs des quatre premières étapes des traitements

La méthode élaborée pour cette nouvelle exploration spatio-temporelle implique tout d'abord l'utilisation de l'algorithme du graphe perceptuel (Figure 48). Celui-ci nous permet de détecter les alignements et les orientations de structures, en reliant chaque point à ses voisins distants d'un pas choisi par l'analyste (Voiron-Canicio, 1995). Ainsi, « le graphe perceptuel, construit à partir des lieux et des chemins qui les relient, dessine un réseau. Si la transformation est réitérée, les sous-ensembles initiaux se regroupent ; les différentes transformations indiquent alors la distance ou le temps mis pour se raccorder ainsi que le chemin emprunté. […] Les structures, on le sait, ne sont pas immuables. L'analyse d'images simule cette évolution » (Voiron-Canicio, 1995).

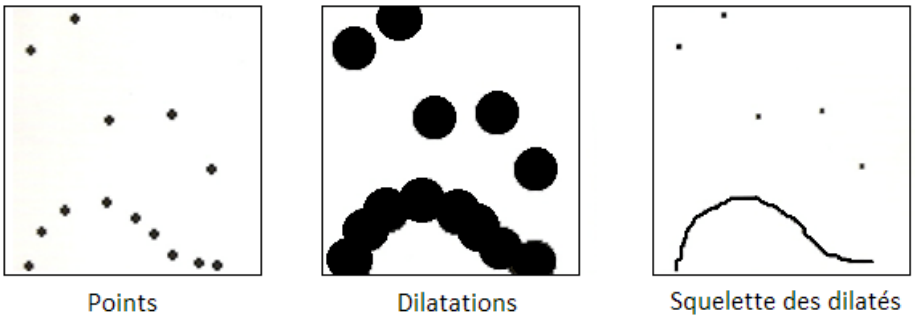


Figure 48 - Le graphe perceptuel (Voiron-Canicio, 1995)

La question est ici de savoir quel pas de dilatation choisir pour détecter les structures spatio-temporelles évoquées. En effet, choisir un pas trop petit ne relierait que des points très proches les uns des autres, et ne ferait apparaître aucune structure significative (notre observation portant toujours sur l'ensemble des données, c'est-à-dire sur une vaste zone d'étude). A l'inverse, un pas trop élevé relierait l'ensemble des points et n'introduirait que peu de différenciation entre les structures.

En outre, choisir un pas de dilatation commun pour chaque « morceau » de rythme détecté précédemment (*phases*, *temps*…) serait, nous semble-t-il, un contresens : cela reviendrait à postuler que les phénomènes détectés s'expriment tous aux mêmes échelles. Au vu des résultats décrits précédemment, nous pensons que choisir des pas « représentatifs » différents en fonction de la phase étudiée aurait une portée bien plus grande en termes de détection et d'interprétation de structures.

Nous avons ainsi choisi de considérer comme « représentative » la distance moyenne entre les points représentée sur les courbes DM1 et DM2, pour chacune des deux méthodes de répartition temporelle des UNAR. Deux tailles de pas sont alors calculées à partir de ces données (Figure 49) :

- Un pas moyen par *temps* (1Aa, 1Ab, 1Ac…)

- Un pas moyen par *phase* (1A, 1B, 1C…)

METHODE 1

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28	A29	A30	A31	A32	A33	
Distance moyenne	15	14	16	13	17	14	19	22	12	17	15	3	4	10	9	9	8	6	2	3	7	7	8	6	6	9	7	8	9	14	6	8	6	…
Niveau 1	16	14		13	16	17		19	13	19	16	3		9	9		9	6	3		7	8		6	7				8	14	6	8	6	
Niveau 2	16											7																						

…Suite…

A34	A35	A36	A37	A38	A39	A40	A41	A42	A43	A44	A45	A46	A47	A48	A49	A50
4	2	6	5	1	1	2	2	2	4	4	4	4	7	7	2	10
4	3	5		2		2	2		4		4		8		2	8
4																

METHODE 2

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28	T29	T30	T31	T32	T33	
Distance moyenne	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	2	2	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	…
Niveau 1	3											1					2				3				3		3				3			
Niveau 2	3											2									3													

…Suite…

T34	T35	T36	T37	T38	T39	T40	T41	T42	T43	T44	T45	T46	T47	T48	T49	T50
2	2	2	2	1	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
2		2		1		2	1		2		2		2		2	2
2				1					2							

Figure 49 - Pas moyen de squelettisation pour chaque «région» identifiée, pour les méthodes 1 et 2.

Un squelette a ensuite été réalisé, pour chaque image représentant la répartition spatiale des UNAR sur 100 ans, et pour chacun des deux pas de calcul. Ceux-ci ont par la suite été comparés au sein de chaque phase et de chaque temps, afin d'évaluer l'homogénéité morphologique de ces niveaux spatio-temporels identifiés.

Une vidéo a à nouveau été réalisée, et mise en ligne sur le site MédiHal au lien suivant :

https://medihal.archives-ouvertes.fr/medihal-01259661

Celle-ci présente les animations réalisées pour visualiser les résultats –par ailleurs bien plus considérés comme des étapes du raisonnement et de l'exploration que comme des « résultats » à part entière - des deux moments « clé » des étapes 4 (présentés ci-dessous, et dont les Figure 50 et Figure 52 constituent les extraits visuels) et 5 (Figure 58), et organisés en quatre séquences.

Les séquences qui nous concernent à ce stade sont les deux premières :

- **Séquence 1 :** Exploration de la morphologie des structures spatio-temporelles: procédure d'analyse spatio-morphologique à partir de la **méthode 1** de répartition des unités archéologiques ;
- **Séquence 2 :** Exploration de la morphologie des structures spatio-temporelles: procédure d'analyse spatio-morphologique à partir de la **méthode 2** de répartition des unités archéologiques.

Chacune des diapositives comporte la *phase* et le *temps* concernés, les courbes des connexités associées et les résultats de l'algorithme du graphe perceptuel, pour chacune des deux méthodes de répartition temporelle des UNAR.

En ce qui concerne la méthode 1 de répartition, étant donné le nombre considérable de courbes de connexités (chaque UNAR ne pouvant se retrouver que dans un seul siècle à la fois, chaque siècle présente une répartition des UNAR différente des autres, et donc une courbe des connexités différente des autres ; ainsi, notre intervalle temporel étant composé de 50 siècles successifs, 50 courbes des connexités ont été réalisées) nous avons calculé, pour les groupes de courbes des connexités estimées « similaires », une courbe moyenne uniquement destinée à faciliter la visualisation des structures.

Afin de faciliter la lecture et la compréhension, le commentaire détaillé qui suit ne s'attache, comme précédemment, qu'aux résultats relatifs à la méthode 2 de répartition des UNAR.

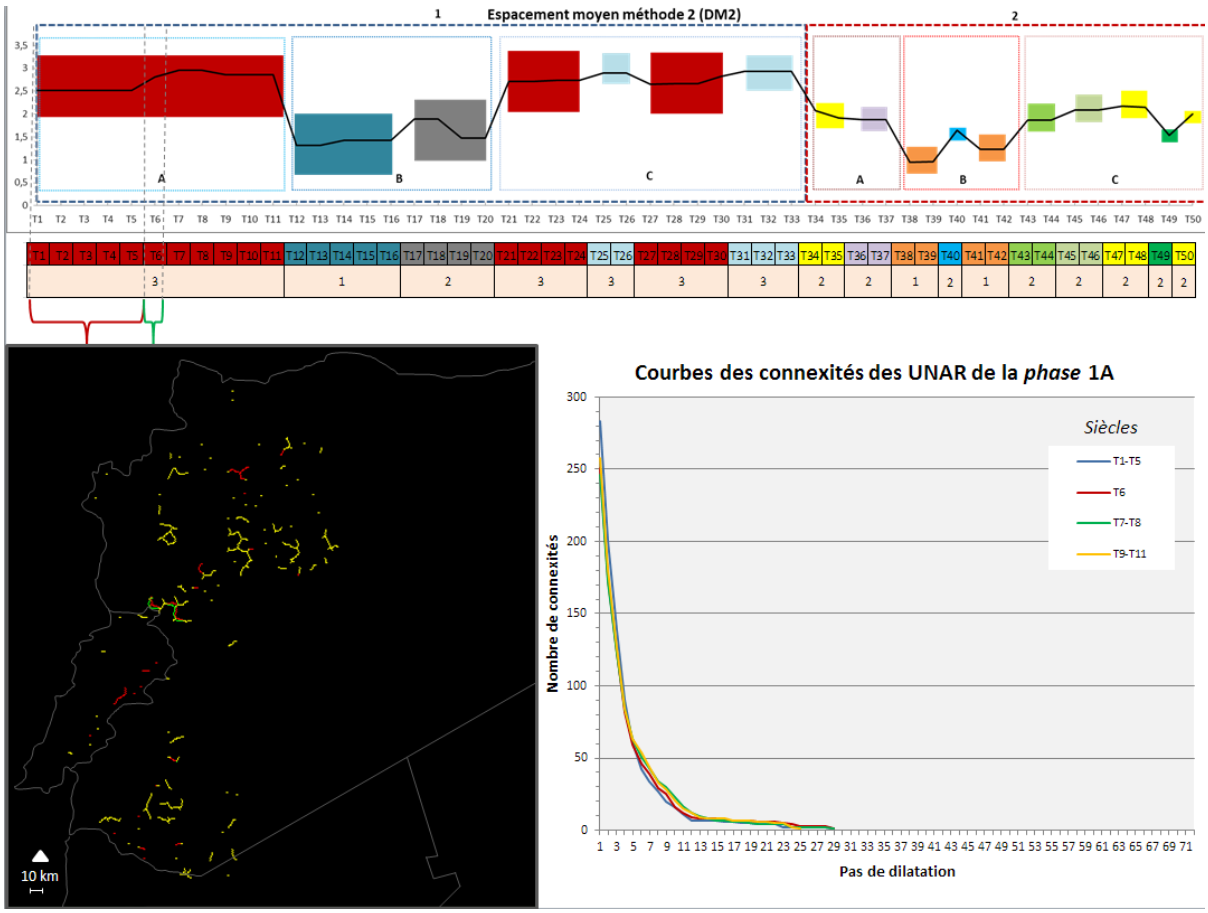


Figure 50 - Résultats des algorithmes perceptuels: comparaison des intervalles temporels 1 à 6 de la méthode 2

Les squelettes réalisés pour la *phase* **1A** montrent bien l'homogénéité de la *phase* en termes de structures spatiales : un nombre faible mais constant de sites sur les 11 siècles de la période, peu

distants les uns des autres, et structurés pour la plupart en alignements Nord-Sud. Les trois paliers dans la distribution des sites détectés au cours de l'analyse des courbes de connexités de cette *phase* se retrouvent ici très bien : la majorité (83%) des sites espacés de 1 à 5 km forment les grands alignements Nord-Sud, les 13% espacés de 6 à 10 km gravitant sous forme de points autour de ces grandes structures (le pas de squelettisation ici utilisé étant de 3 km, ces structures n'ont pas été reliées les unes avec les autres), et les 3% restants se situant bien plus en marge de ces structures.

Le passage à la *phase* **1B** est matérialisé par une augmentation considérable du nombre de sites, notamment au *temps* **1Ba** : le resserrement du peuplement pressenti sur les courbes se manifeste ici par une densification des sites autour des structures déjà détectées à la *phase* précédente, et par l'apparition d'une nouvelle zone de forte densité de sites au long de la frontière libano-syrienne. Le *temps* 1Ba démontre une grande homogénéité, les squelettes des cinq tranches de 100 ans composant ce *temps* se superposant parfaitement. La densité de ces structures baisse au cours du *temps* **1Bb** mais les formes se maintiennent, sauf l'alignement détecté à la frontière libano-syrienne qui disparaît totalement lors des deux premiers siècles du *temps* 1Bb, pour réapparaître aux deux suivants.

Le *temps* **1Ca** marque le retour à un peuplement moins dense, aux espacements similaires à ceux de la *phase* 1A à laquelle il a été associé sur les graphes de connexités. Mais si les distances entre les points sont similaires entre les deux configurations, les structures spatiales diffèrent, et on détecte à présent un alignement de structures depuis le Sud-Est du Liban jusqu'au Nord-Est de la Syrie, où il se décompose peu à peu en un nuage de petites structures plus éloignées les unes des autres. On note cependant la persistance depuis la *phase* 1A d'une structure circulaire au Sud de la Syrie, au Sud de laquelle gravitent des sites relativement isolés les uns des autres. Le *temps* **1Cc** peut, quant à lui, être plus facilement rapproché du *temps* 1Ca auquel il est associé, en termes de structures spatiales, qui semblent se maintenir.

Mais ces deux *temps* similaires sont coupés par le *temps* **1Cb** qui matérialise quant à lui une chute considérable dans le nombre de données : seules les structures majeures, au sud et au Centre-Ouest de la Syrie, demeurent. On note en outre, que cette image des structures spatiales au cours de la *phase* 1Cb est très similaire au *temps* qui lui est associé, **1Cd.** Ces structures expliquent l'allongement des distances sur les courbes de connexités, le pavage de sites étant moins régulier, et seules les structures majeures au Centre, au Sud de la Syrie et, dans une moins grande mesure, l'alignement libanais demeurant, les distances entre les sites voisins s'allongent. En outre, la structure circulaire présente au Sud de la Syrie semble commencer à s'affaiblir à partir du *temps* 1Cc, ce qui continue au *temps* 1Cd, pour pratiquement disparaître au passage au *temps* 2Aa.

Le *temps* **2Aa** présente également une grande homogénéité sur les deux siècles qui le constituent : les squelettes de ces deux tranches de 100 ans se superposent parfaitement.

Le *temps* **2Ab** introduit une grande différenciation : alors que les sites libanais disparaissent, ceux du sud de la Syrie réapparaissent (ce qui peut expliquer un total de sites constant au sein de la *phase*. La structure plus vaste au Centre-Ouest de la Syrie se scinde en deux parties, dont seule la plus au Sud demeure. On note en revanche l'apparition de sites isolés au Centre-Est de la Syrie, très éloignés des structures principales : ce phénomène peut expliquer l'allongement du palier final de la courbe des connexités du *temps* 2Ab.

Le resserrement du peuplement et l'augmentation brutale du nombre de sites évoqués plus haut et caractérisant le *temps* **2Ba** se manifestent bien dans les structures spatiales de ce *temps*. Les structures majeures identifiées au Centre-Ouest de la Syrie et au Liban sont ici bien représentées, affichant de surcroît une continuité sans précédent. La concentration au sud de la Syrie s'est également à nouveau renforcée. Cette structure se maintient presque à l'identique au *temps* **2Bc**, associé à celui-ci.

La chute du nombre de sites au *temps* **2Bb** qui entrecoupe les *temps* homogènes 2Ba et 2Bc semble quant à elle due à la disparition totale des sites libanais, et à un affaiblissement considérable de la partie septentrionale de la structure Centrale, qui s'était scindée en deux parts à la *phase* 2A. Il est également surprenant de constater à quel point l'analogie réalisée précédemment entre les *temps* 1Ba et 2Ba et 2Bc se vérifie également dans les structures spatiales, très similaires entre ces moments.

Les *temps* **2Ca** et **2Cb** sont quant à eux marqués par une baisse dans le nombre et la densité de structures, qui s'avèrent en outre pratiquement identiques entre ces deux *temps* : la différence réside dans un affaiblissement de la partie Nord de la structure centrale, qui n'est presque plus visible au *temps* 2Cb. Cette évolution se poursuit jusqu'à ce que cette structure disparaisse totalement au *temps* **2Cc** -les autres structures identifiées sur 2Ca et 2Cb se maintiennent sur ce troisième *temps*. La structure du *temps* 2Cc se retrouve à l'identique sur le dernier *temps* **2Ce** qui lui est associé. Ces deux *temps* sont entrecoupés du *temps* **2Cd** durant un siècle, marquant la réapparition –éclair- de la structure centrale disparue. L'analogie de ces deux *temps* avec le *temps* 2Aa initiant la zone 2, ne se vérifie ici que par la présence forte de l'alignement de sites libanais, et de la partie Sud de la concentration centrale, et d'un nombre de sites équivalent.

Cette étape a permis de questionner morphologiquement la consistance spatio-temporelle des niveaux préalablement construits, et des structures spatiales qu'ils expriment. On constate en effet que les structures identifiées s'organisent majoritairement autour de trois pôles,

correspondant aux zones prospectées par les missions archéologiques : les Marges Arides pour la partie centrale, Le Liban, ainsi que la Syrie du Sud. Cependant, cette configuration « de base » fluctue considérablement au cours du *temps* : ces trois « régions » semblent se construire et se déconstruire au fil du *temps*, et à des rythmes différents. En outre, il semblerait qu'au sein même de ces grandes configurations, l'ancrage spatio-temporel des diverses structures spatiales ne soit pas homogène. L'étape suivante consiste donc à mettre en évidence les divers types de structures et leur ancrage spatio-temporel.

5. IDENTIFICATION DE LA MORPHOLOGIE DES STRUCTURES SPATIO-TEMPORELLES : LES UNITES SPATIO-TEMPORELLES ELEMENTAIRES

5.1 Typologie des profils de structures spatiales détectées : ancrage spatio-temporel des structures

Dès lors, un problème se pose : comment distinguer l'ancrage spatio-temporel des structures au sein d'une même *phase*, d'un même *temps* ? De quelle façon « délimiter » ces structures, si ce n'est par leur taille ? Bien que ce paramètre entre en compte dans cette évaluation, il ne peut constituer l'unique paramètre à prendre en compte : cela reviendrait à postuler que seules les grandes structures sont ancrées dans le temps et dans l'espace, ce qui n'est pas forcément vrai, comme nous l'avons vu dans le cas des sites libanais : ces alignements pourtant considérables peuvent s'avérer extrêmement fluctuants. Or, des structures de plus petite taille peuvent perdurer bien plus que des grandes structures.

En outre, comparer l' « image » des structures spatiales représentatives de chaque *temps* ou *phase* n'est pas non plus la démarche que nous proposons : il ne s'agit pas ici de déconstruire la périodisation initiale pour finir par se rigidifier et se fixer dans une autre approche, même spatiale. Les divers niveaux proposés et élaborés à partir des traitements spatio-morphologiques ne sont que des niveaux d'observation, à partir desquels on interroge et on explore l'espace et le temps. Ils n'ont pour vocation que de voir sous un angle nouveau la chronologie initiale de la base de données et de l'espace étudié, certainement pas à remplacer celle-ci. Toute méthode de construction d'une chronologie, qu'elle soit basée sur des typologies céramiques, sur des structures spatiales ou autre, doit ainsi selon nous être envisagée dans une optique de complémentarité, de valeur ajoutée, d'un éclairage supplémentaire sur un passé incertain. Les niveaux d'observation peuvent donc –doivent- être remis en question, enrichis au fur et à mesure que les questionnements, les réponses –partielles-, et les orientations de la recherche évoluent. Les structures et les dynamiques spatio-temporelles ne doivent ainsi pas ici être considérées simplement dans les modalités de leur passage d'une *phase* à une autre, mais également au sein

d'une même *phase*, d'un même *temps*, afin de ne pas abolir l'idée de durée « à l'intérieur » de ces catégories d'observation.

Cependant, nous ne pouvons nous fier uniquement à la répartition des données par la méthode 2, bien qu'elle soit plus fidèle à la chronologie initiale: par le lissage qu'elle crée, il est impossible de différencier l'ancrage spatio-temporel des structures au sein d'un *temps* ou d'une *phase*, ou de l'un à l'autre de ces niveaux d'observation. Par exemple, il est impossible en regardant les résultats de l'algorithme du graphe perceptuel des cinq premiers siècles de différencier les structures fortes et ancrées dans l'espace, des signaux plus faibles. La démarche proposée est donc de s'appuyer sur la complémentarité entre nos deux méthodes de répartition des UNAR, l'une aléatoire, l'autre cumulée, afin de mettre en évidence le « poids » spatio-temporel des structures spatiales identifiées. La méthode 1 proposant une répartition des UNAR par siècle, ce sont les résultats des squelettisations réalisées à partir de ces données qui nous permettront d'identifier et de pondérer les structures détectées par les squelettisations réalisées avec la méthode 2. La méthode 1 peut donc agir comme un filtre au travers duquel on distingue les organisations spatiales qui sont fortement ancrées -qui se retrouvent à chaque siècle au sein d'un *temps*, d'une *phase*- et celles qui apparaissent et disparaissent de façon plus sporadique. Ainsi, en considérant simultanément les résultats des algorithmes des graphes perceptuels des deux méthodes pour un même intervalle temporel, nous avons pu identifier plusieurs profils de structures, comme le montre la Figure 51 :

- Les « grandes » structures fortement ancrées dans l'espace et le temps: celles qui sont représentées par les deux méthodes de répartition ;
- Les structures « moyennement » ancrées dans l'espace et le temps ;
- Les signaux faibles : structures exprimées par une seule méthode de répartition. Petites structures, assez variables dans l'espace et dans le temps, recelant peut-être de la connaissance nouvelle.

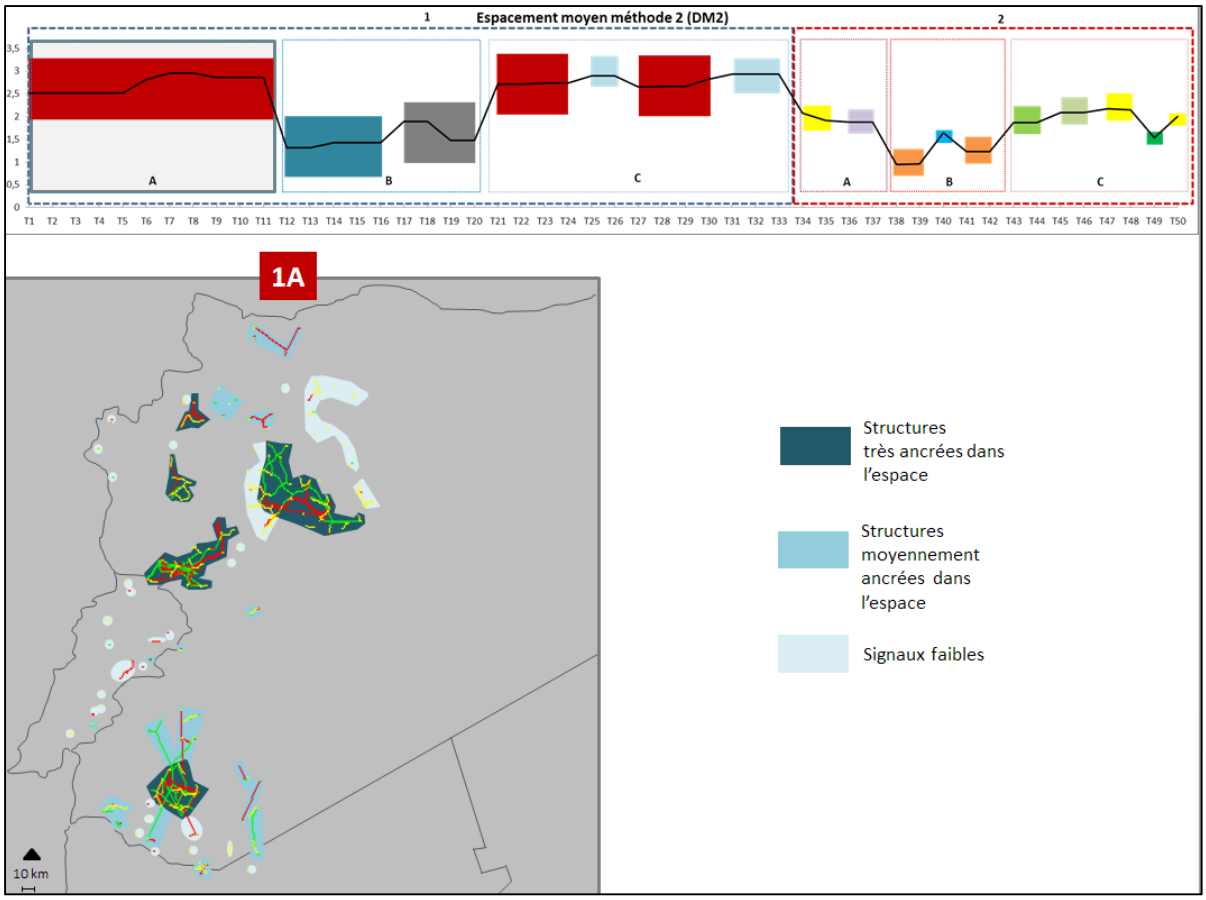


Figure 51 - Typologie des profils de structures pour le niveau 1A

Afin de mieux percevoir le changement spatio-temporel, nous avons superposé les zones d'un *temps* avec les limites des *temps* de la période antérieure (en pointillés sur la Figure 52).

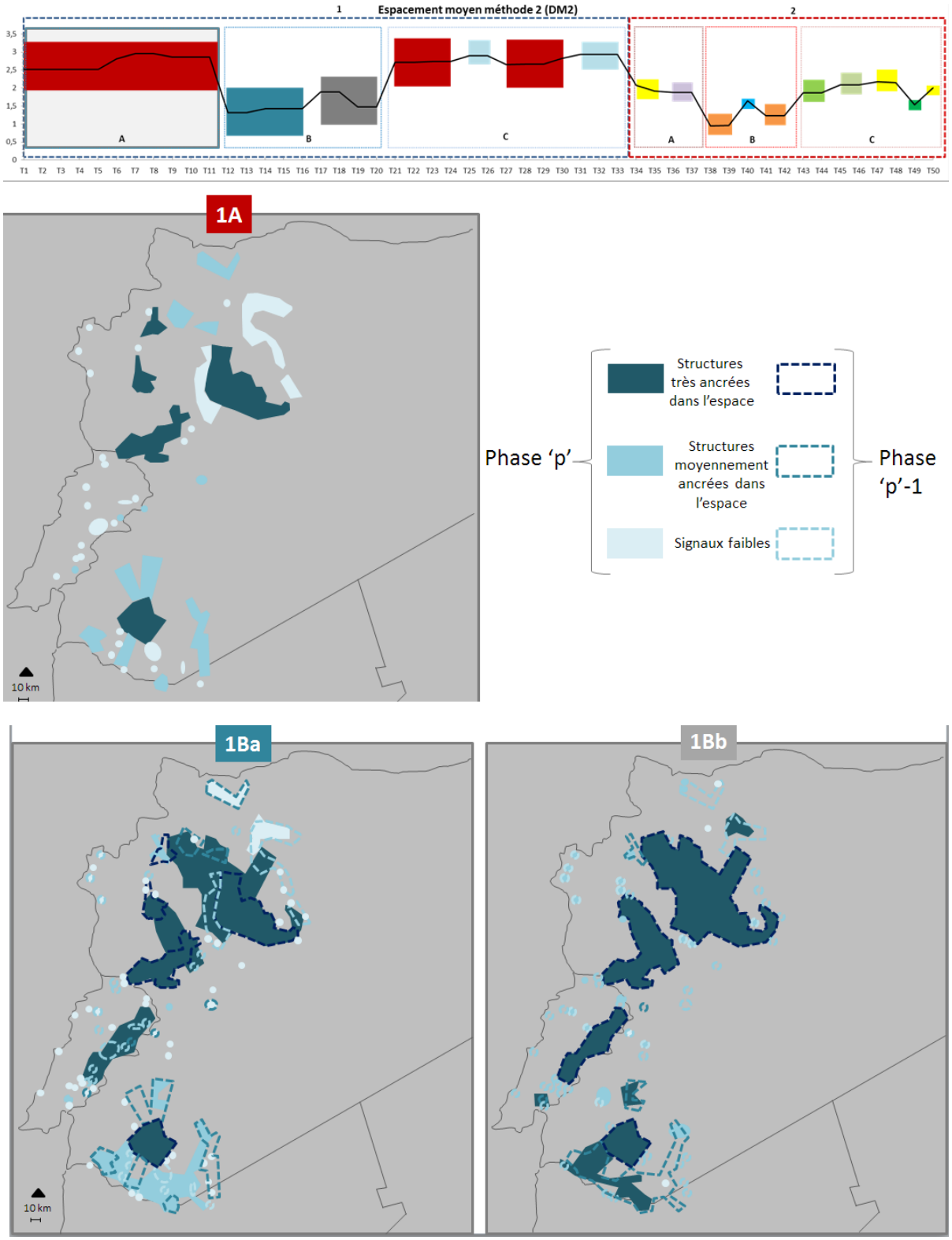


Figure 52 - Changements dans les profils de structures spatio-temporelles de la phase 1A à la phase 1B

La Figure 52 constitue un extrait de l'animation destinée à visualiser les changements dans les profils de structures spatio-temporelles entre chaque temps et chaque phase, et proposée dans la

Séquence 3 de la vidéo évoquée plus haut et disponible au lien suivant : https://medihal.archives-ouvertes.fr/medihal-01259661

Le commentaire qui suit décrit ces structures, ou plus précisément, les « aberrations » que l'on y trouve et qui pourraient souligner des artefacts dans les données -montrant ainsi leur impact dans les structures spatiales observées.

- **1A :** le vide dans la zone du Liban et en périphérie nord provient certainement de la difficulté de préciser les chronologies du Bronze ancien I, II et III. Les quelques points qui apparaissent en signal, se précisent cependant par la suite (1Ba) pour le Liban et pour le sud de la Syrie.
- Pour les Marges Arides au Nord-Est, on constate assez nettement un phénomène d'extension correspondant au Bronze Ancien IV (**1Ba**) et globalement une continuité au Bronze Moyen 1 (**1Bb**) qui parait un peu artificielle et pourrait possiblement venir du grand nombre de sites datés du Bronze Moyen « indéterminé ».
- **1Ca, 1Cb :** la faiblesse en structures s'explique par une difficulté de datation due à l'attribution de la date « Bronze Moyen » et « Bronze Récent » sans plus de précision ; on observe le même phénomène pour l'âge du Fer (**1Cc**).
- **1Cd, 2Aa :** datation difficile séparant mal le Fer III du début de la période hellénistique.
- **2Ab** : le vide dans le Nord-Est sans doute dû là encore à une mauvaise connaissance de la céramique du 1^{er}s av. J.-C. (alors qu'au sud on a beaucoup plus de repères). Il semblerait que l'on puisse passer pour le Nord directement de 2Aa à 2Ba l'effet de vide de 2Ab n'ayant pas de grande signification.
- **2Bb** : le vide du Liban est dû à une mauvaise borne de datation qui exclut le troisième siècle. Il ne faut donc reprendre pour le Liban que les données de la plaine de la Bekaa pour les *phases* 2B et 2C (pour les autres régions du Liban, les dates Byzantin et Islamique n'ont pas été enregistrées).

5.2 Interprétation et synthèse des résultats obtenus

Cette typologie des structures spatiales détectées à l'aide de l'algorithme du graphe perceptuel, avec l'aide des deux méthodes de répartition des UNAR, nous a permis de mettre en évidence :

- Les grands changements / les périodes de continuité sur l'ensemble de la zone et des périodes, afin d'en avoir une vue d'ensemble.

- Des zones pouvant constituer des cas d'étude, des échelles particulières : à la fois des grandes structures, mais aussi de façon moins évidente, des « signaux faibles », moins souvent étudiés, plus souvent considérés comme du bruit que des structures à part entière.
- Les cas « aberrants » : des lieux et des moments où l'on subodore un « trou » dans les données. Cela permet de mettre en évidence et donc de contourner ce qui pourrait être source d'erreurs et de fausses interprétations.

Cette démarche a en fait permis de réintroduire l'idée de mouvement et de nuancer l'apparente « stabilité » interne des périodes de la chronologie, par la notion d' « ancrage spatio-temporel » des structures. Cela nous montre également l'impact des choix réalisés dans la constitution des bases de données, et l'impact des artefacts sur les structures spatiales. La Figure 53 synthétise le raisonnement et les traitements effectués au cours de cette étape.

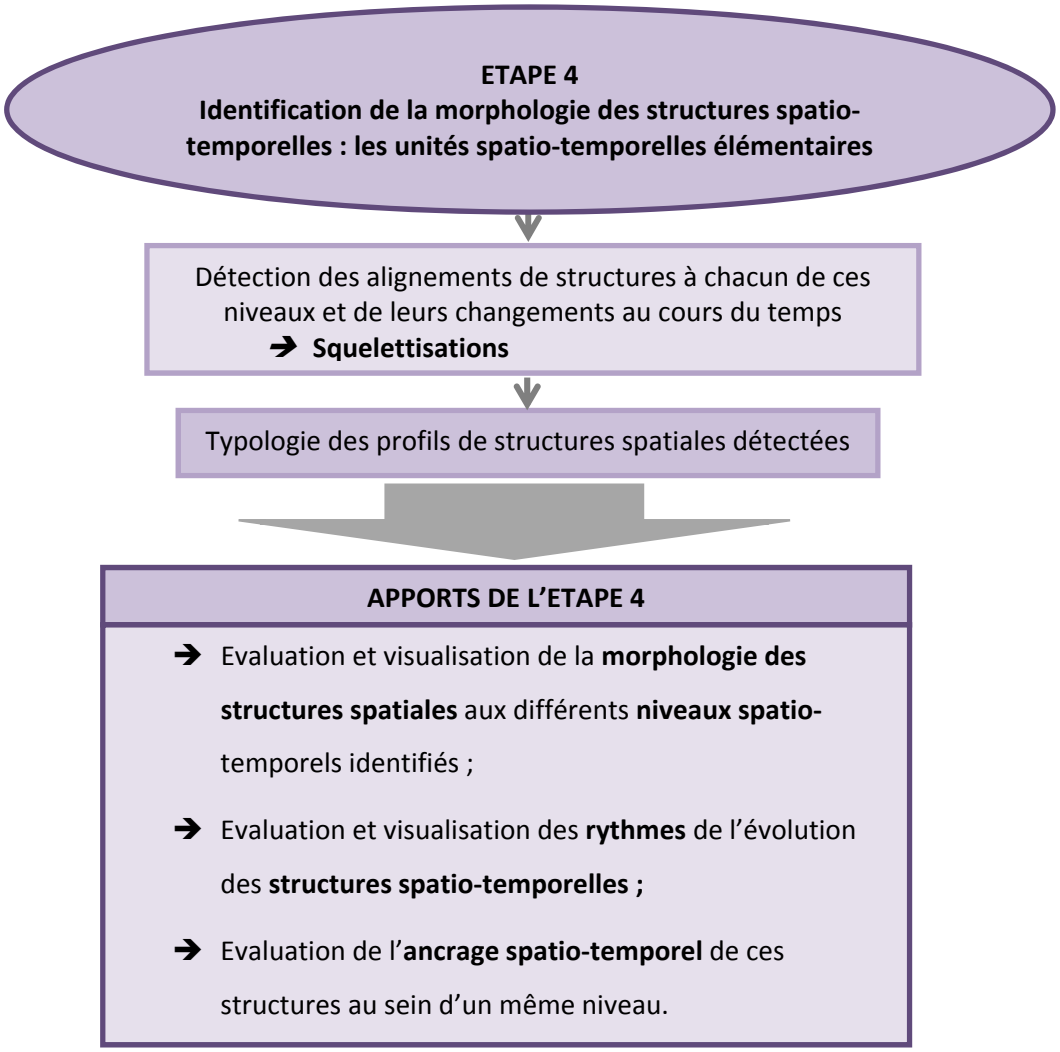


Figure 53 - Synthèse des opérations et des apports de la quatrième étape des traitements

D'un point de vue pratique, ce système permet une observation des structures et des dynamiques spatio-temporelles dans la longue durée, en réduisant le nombre de cartes à manipuler.

Nous observons également qu'en « sacrifiant » une précision temporelle maximale, écartée à ce stade de l'étude, on peut faire l'hypothèse d'une plus grande fiabilité de l'appartenance des UNAR aux *temps* identifiés, qui regroupent plusieurs sous-périodes. Le jeu entre précision et fiabilité (Figure 54) peut donc être testé en toute conscience par l'analyste, qui peut choisir, en fonction des aspects qu'il souhaite mettre en lumière et de ses échelles d'étude, de favoriser la fiabilité de ses observations, ce qui s'accompagne d'une baisse de la précision (démarche adoptée dans la partie 2 de cette étude), ou de chercher une précision maximale –ce qui doit s'accompagner d'une démarche de quantification et de visualisation de l'incertitude créée par la baisse de la fiabilité engendrée (démarche qui sera adoptée dans la partie 3 de cette étude).

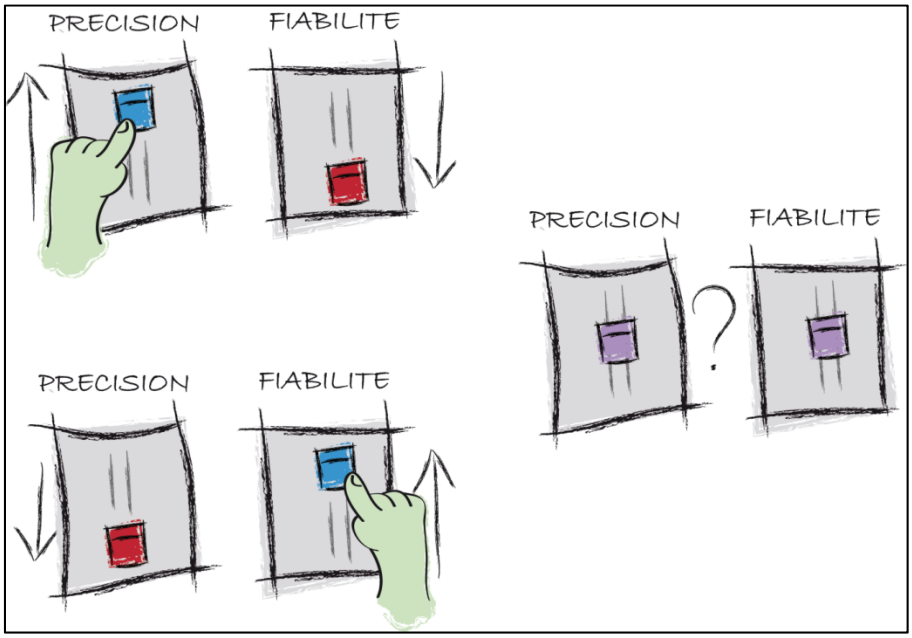


Figure 54 - Le jeu entre précision et fiabilité (Fusco, J. 2015)

Parallèlement, l'identité des « unités spatiales élémentaires » sur lesquelles se basent généralement les raisonnements en archéologie est le plus souvent définie à partir de zones bioclimatiques (les « Marges Arides ») ou de la position géographique de ces espaces (la « Syrie du Sud »), au sein de zones de prospection constituant elles-mêmes déjà des cadres d'étude à part entière. S'il est très difficile de s'affranchir des régions constituées par les zones de prospection –tout comme il est très difficile de s'affranchir des périodisations déjà établies- constituant des cadres d'étude *a priori*, le but était ici de remettre ces régionalisations en question en ne se basant pas sur des critères environnementaux mais sur les structures spatiales formées par la position des sites archéologiques. Il s'agit donc simplement de changer de point de vue sur la constitution des objets d'étude, en les envisageant de manière dynamique : les objets d'étude portent ainsi en eux-mêmes, intrinsèquement, une dimension évolutive, spatio-temporelle. Il ne s'agit donc plus d'observer le changement s'opérant dans les limites d'un objet statique d'une période à l'autre

(l'évolution de la « Syrie du Sud » au cours du temps par exemple) mais de considérer que chaque période-région est porteuse, en soi, de son propre objet d'étude.

Il convient cependant de rappeler que les données nous ayant permis d'élaborer ces périodes-régions sont empreintes de diverses formes d'incertitude. L'expérimentation qui suit a donc pour objectif de proposer une démarche d'intégration de l'incertitude dans les régionalisations réalisées, et ainsi d'observer les différences introduites par la prise en compte de cette dimension.

6. APPORT D'UNE PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE DANS LA DETECTION DES STRUCTURES SPATIO-TEMPORELLES : PROCEDURE D'ANALYSE SPATIO-MORPHOLOGIQUE EN CONTEXTE INCERTAIN

Les données sur lesquelles se basent ces divers traitements sont, comme nous l'avons montré sous différents aspects dans les chapitres 3, 4 et 5 de cette étude, empreintes de diverses formes d'incertitude. L'objectif est ici de passer de la visualisation de l'incertitude proposée précédemment à une intégration de cette dimension dans les traitements d'analyse spatiale, afin de questionner la morphologie, voire l'existence des structures spatio-temporelles détectées précédemment (Figure 55).

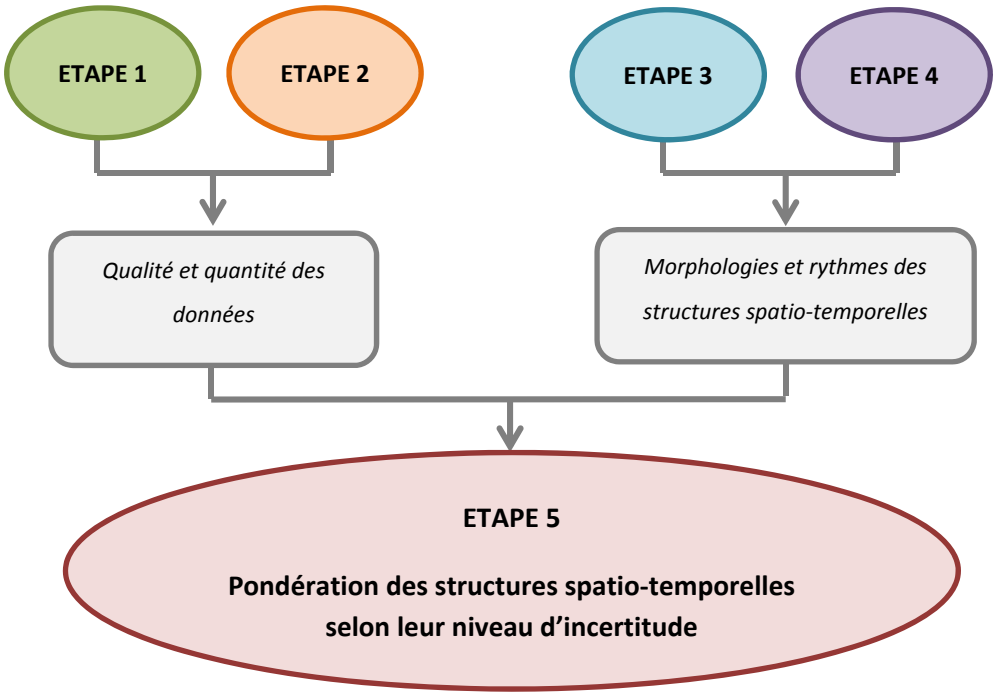


Figure 55 - Chaînage et objectifs des cinq premières étapes de l'étude

La dimension d'incertitude choisie pour cette nouvelle représentation concerne ici l'intensité de la prospection archéologique de la zone étudiée : cet espace n'ayant pas été prospecté de façon homogène, par des outils et une minutie similaires, la qualité spatiale des données est empreinte

de cette hétérogénéité. Ces dernières ne doivent donc pas contribuer à l'élaboration des structures spatiales avec le même poids.

Nous disposons, afin de renseigner cette dimension d'incertitude, de la carte élaborée par les archéologues du programme PaléoSyr attestant des divers niveaux de qualité de la prospection archéologique de la zone étudiée (Figure 15). Cette information étant disponible sous forme de couche SIG, chaque UNAR s'est ainsi vue attribuer un niveau d'incertitude inhérent à la prospection de la zone dans laquelle elle est située.

Il convient de préciser que la fiabilité de la datation, niveau d'incertitude temporelle également disponible pour chaque UNAR, n'a pas été mobilisée à cette étape de l'étude, ou plutôt, à cette échelle spatio-temporelle : le regroupement des UNAR en différents « temps » effectué précédemment, en diminuant la précision de la datation au profit d'une dimension typologique et morphologique, diminue de fait l'incertitude attachée à la fiabilité de cette datation. Ce niveau d'incertitude sera ainsi mobilisé à une échelle spatio-temporelle plus fine, où l'augmentation de la précision temporelle s'accompagne inévitablement d'une baisse de la fiabilité de ce paramètre, et donc de la nécessité de prendre cette donnée en compte dans les analyses.

Six niveaux d'incertitude spatiale, décrits sur la Figure 15 (partie I, chapitre 3), du plus fort (non prospecté) au plus faible (prospection systématique détaillée) sont donc mobilisés dans cette analyse. La technique employée afin de visualiser l'impact de ces niveaux d'incertitude dans les structures spatiales détectées consiste à séparer en six images différentes les UNAR en fonction de leur appartenance à l'un des six niveaux de prospection (Figure 56).

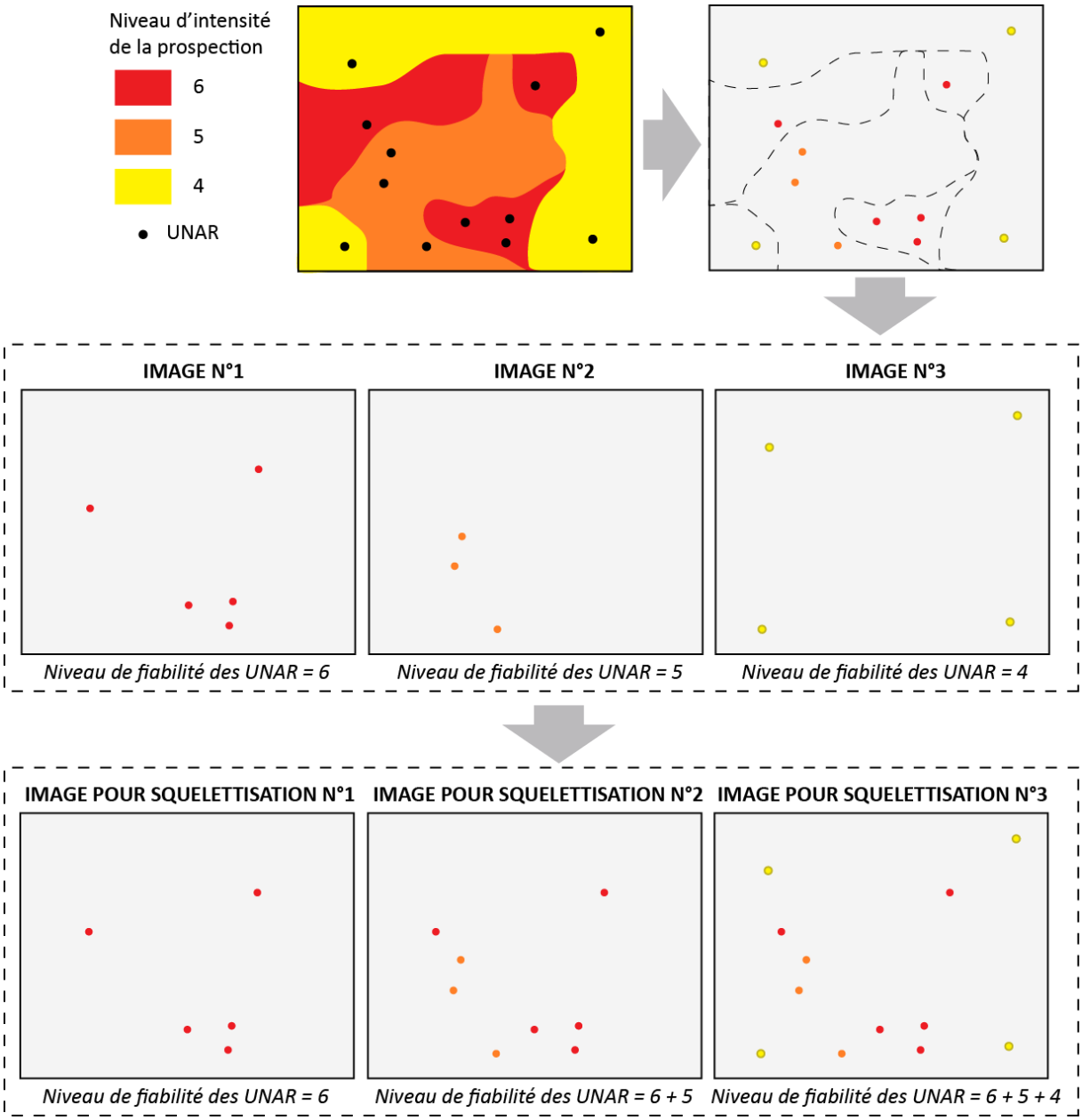
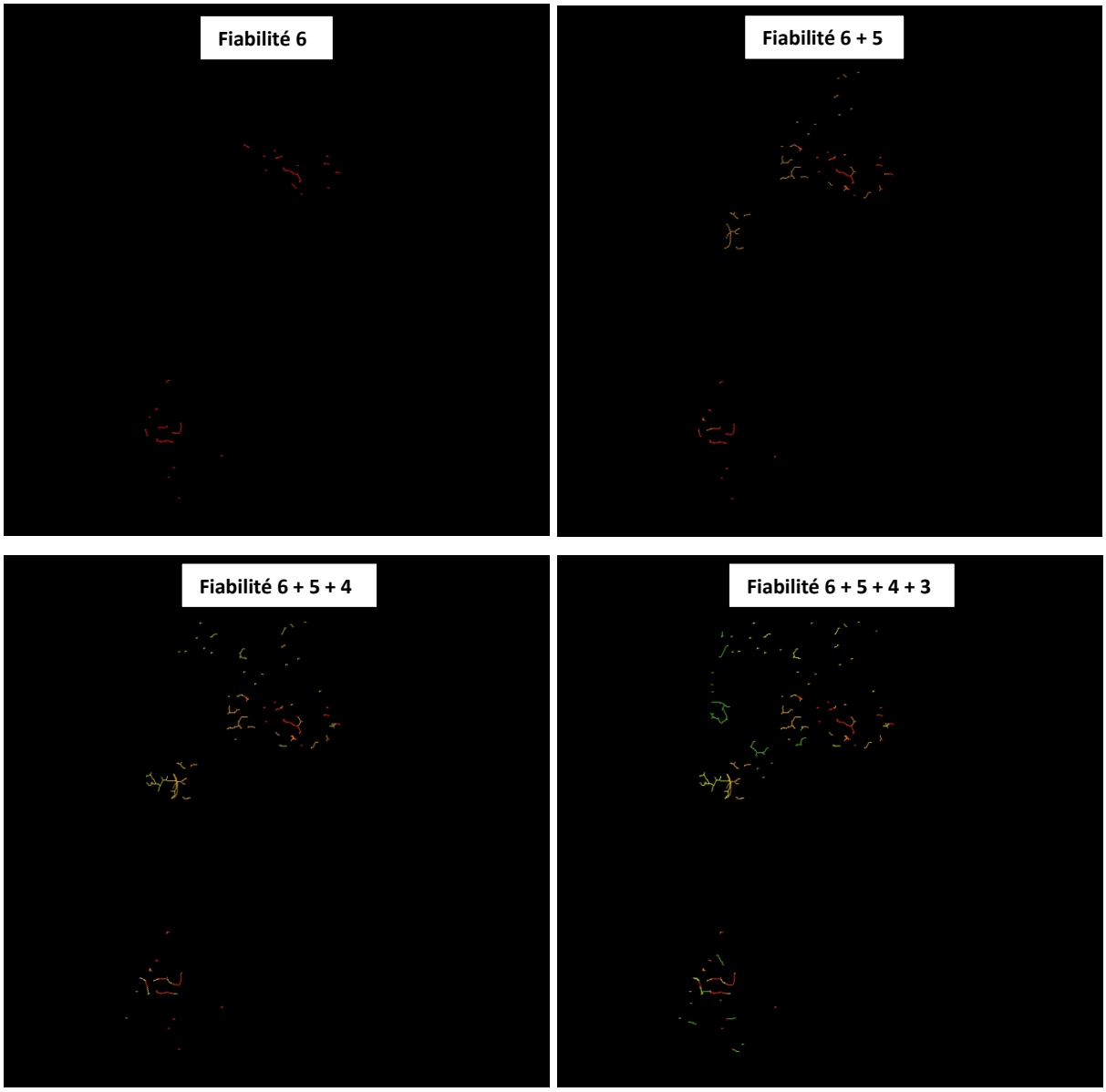


Figure 56 - Préparation des images nécessaires à la squelettisation intégrant les niveaux de fiabilité de la prospection

Les squelettisations réalisées représenteront donc successivement les alignements de structures créées par les UNAR les plus fiables, puis celles créées par les UNAR les plus fiables et celles l'étant un peu moins, et ainsi de suite jusqu'à épuisement des six niveaux de fiabilité de la prospection (Figure 57).

Cette procédure a été réalisée pour chaque *temps* (1A, 1Ba, 1Bb…) identifié précédemment, afin de comparer les résultats obtenus aux « régions » identifiées précédemment, ou plutôt, d'éclairer les régions constituées à la lumière de ces nouvelles informations.

Les « régions » détectées précédemment ont donc pu être enrichies de ce nouveau niveau de connaissance sur la fiabilité des données ayant permis de les constituer. Les structures non colorées sur la Figure 57correspondent aux zones qui ne sont pas renseignées sur les cartes des niveaux d'intensité de la prospection, et pour lesquelles nous ne disposons donc pas de l'information relative à leur incertitude.



(Suite de la figure page suivante)

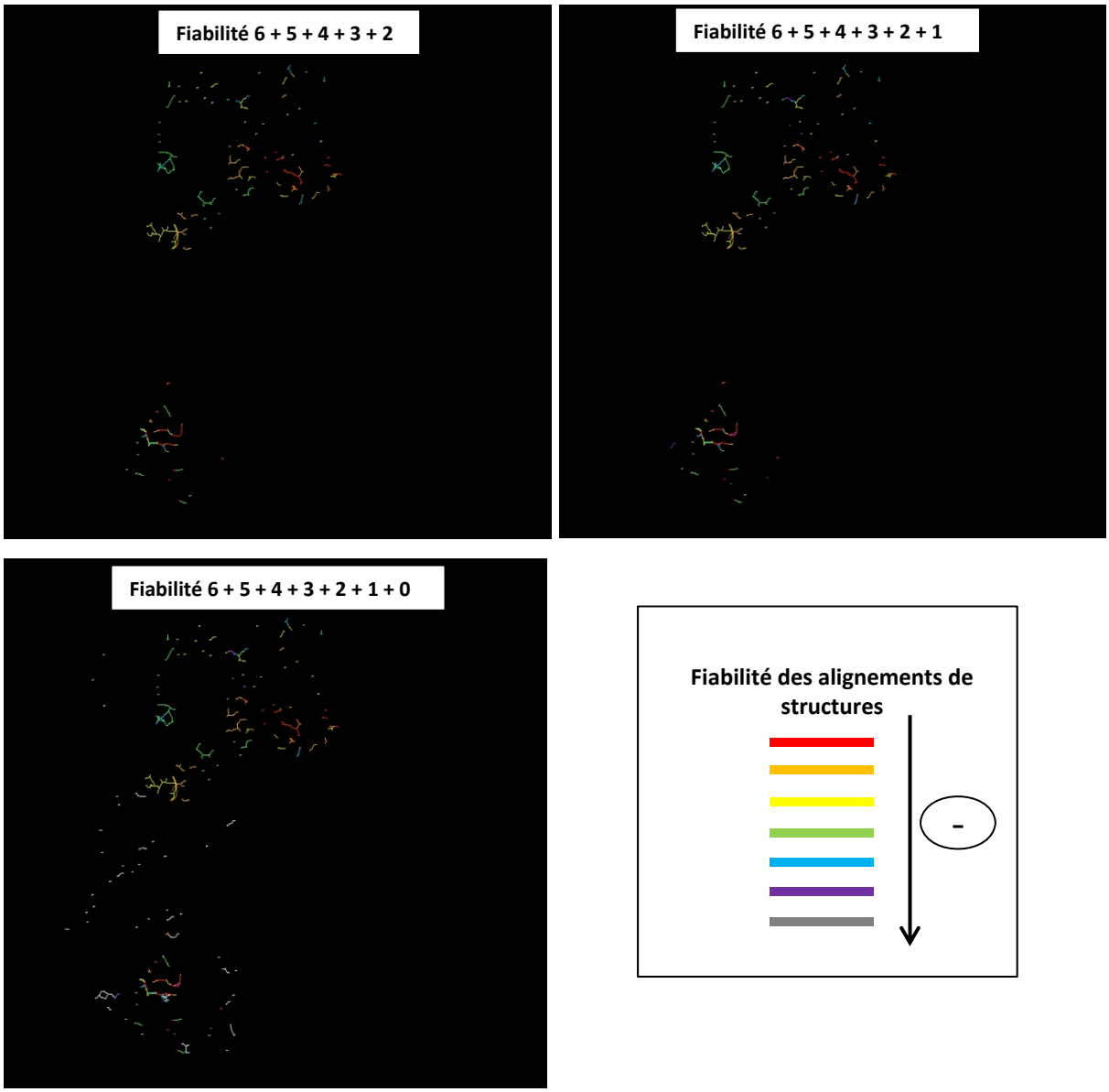


Figure 57 - Enchaînement des squelettisations en fonction du niveau de fiabilité de la prospection pour le *temps* 1A

La Figure 58 montre le passage des unités spatio-temporelles détectées précédemment (**Séquences 1**, **2** et **3** de la vidéo) aux unités spatio-temporelles *floues*, et a été élaborée à partir d'un extrait de la dernière animation proposée, constituant la **Séquence 4** de la vidéo (disponible au lien suivant : https://medihal.archives-ouvertes.fr/medihal-01259661), destinée à visualiser l'évolution spatio-temporelle des profils de structures *floues* détectées.

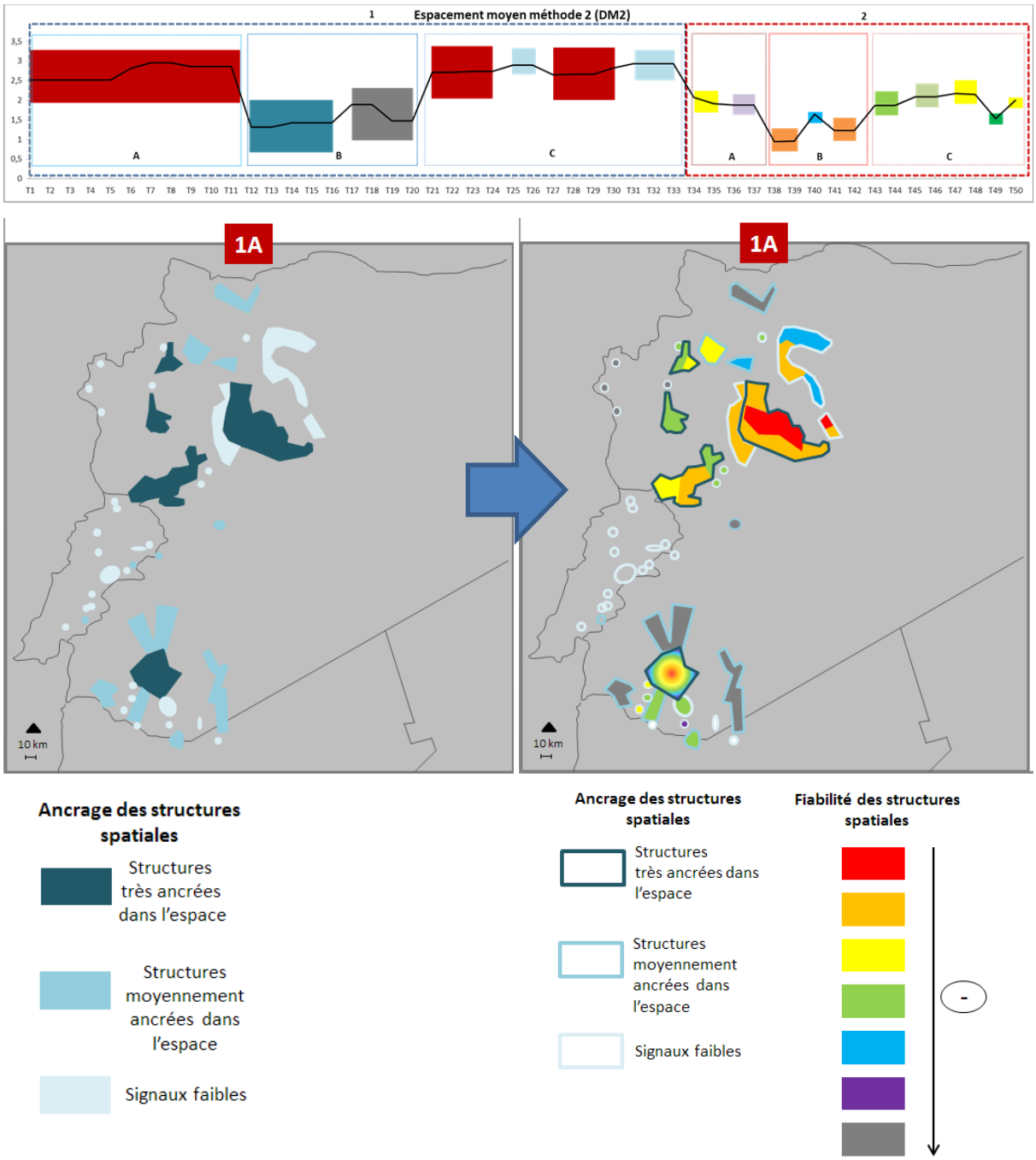


Figure 58 - Ajout de la dimension d'incertitude aux unités spatio-temporelles : les unités spatio-temporelles *floues*

Cette démarche permet de visualiser directement dans les structures spatiales détectées, l'incertitude des données ayant contribué à les élaborer. Ainsi, si les zones d'intensité de la prospection ne varient pas dans le temps et ne peuvent être visualisées que de manière statique, les données et donc, les structures spatiales auxquelles elles contribuent, elles, présentent une grande variabilité spatio-temporelle. La démarche élaborée permet donc de visualiser l'information contenue dans les cartes des niveaux de prospection dans leur influence sur les

structures et les dynamiques spatio-temporelles du peuplement à l'échelle de la zone couverte par la base de données.

L'approche de régionalisation qui est ici menée s'inscrit dans le cadre et la philosphie de l' « *espace géographique flou* » tel qu'il est défini par Christiane Rolland-May (1984, 1987, 1996) à partir de la théorie des sous-ensembles flous introduite par Zadeh (1965, 1968). Dans le cadre de cette théorie, Christiane Rolland-May différencie le « cœur » de *l'espace géographique flou*, c'est-à-dire « le sous-espace qui lui appartient entièrement et sans ambiguité » (Rolland-May, 1987) et les « franges », « représentées par le sous-ensemble dont les composantes appartiennent plus ou moins à cet espace » (Rolland-May, 1987), c'est-à-dire les *limites floues* de l'espace géographique (Figure 59).

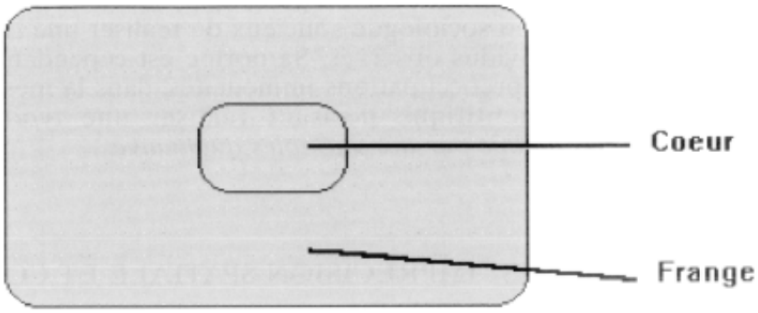


Figure 59 - Configuration d'un *espace géographique flou* (Rolland-May, 1996)

Ici, le « cœur » et les « franges » ne peuvent toutefois pas être définis de manière aussi catégorique. En effet, si le niveau maximum de fiabilité peut être considéré comme le « cœur » de l'espace géographique, et le niveau minimum comme les « franges », entre les deux se déclinent diverses structures spatiales « plus ou moins fiables » dont l'appartenance à l'une ou l'autre catégorie n'est pas si évidente que cela. La configuration de *l'espace géographique flou* se présente ainsi, dans notre cas, plus sous une forme de gradient que dans une distinction binaire.

CONCLUSION

Le cheminement adopté dans cette étape de la recherche consistait à la fois à proposer une image claire, globale et synthétique d'une base de données archéologique très hétérogène dans ses niveaux de qualité des données, et concernant une vaste zone géographique et étendue de temps, et à en proposer un angle de vue original, tentant de s'extraire des carcans de la périodisation et de la régionalisation sous forme de « missions », en abordant cette problématique sous l'angle des structures spatio-temporelles *floues*.

Il serait inapproprié d'affirmer que cet objectif d'« affranchissement » des carcans spatiaux et temporels qui conditionnent les études d'archéologie est ici atteint : il nous semble en fait, au terme de cette étape, que tant que les typologies établies dans la datation des UNAR et des sites qui y sont associés seront aussi rigides, toute perception des dynamiques spatio-temporelles des systèmes de peuplement passés ne pourra véritablement s'effectuer que sous forme de « bonds » dans le temps, en passant d'une période à l'autre de façon extrêmement artificielle, empêchant la perception subtile des processus sous-jacents. L'incertitude ne devrait peut-être pas être considérée uniquement *a posteriori* comme c'est presque toujours le cas aujourd'hui en archéologie (et en géographie), mais devrait être intégrée dès la collecte des données non seulement comme un attribut de l'artefact, de l'UNAR ou du site en question (au même titre que sa taille ou ses matériaux de construction par exemple) mais comme le point de vue, voire la philosophie à partir desquels on considère les données. Farinetti et al. (2004) énoncent dans cette logique que « we therefore should deal with the degree of uncertainty since the beginning of the processing of our collected datasets, and therefore at the sherd database level, as we saw, in order to get less biased results at the end of the process ».

Le travail effectué ici soulève certes sans doute plus de questions qu'il n'apporte de réponses ; il constitue en outre une approche possible d'évaluation du cadre interprétatif nécessaire à leur formulation tout en ayant conscience de ce qu'elles impliquent en termes d'incertitude spatiale, temporelle et thématique.

Notre démarche allant toujours « du général au particulier », et dans le but d'évaluer la portée locale des informations produites, nous allons à présent explorer une zone particulière de l'espace étudié jusqu'ici –qui sera choisie à partir des régionalisations spatio-temporelles *floues* élaborées au cours de la partie II. Le changement d'échelle impliquant forcément des questionnements plus précis et de nature thématique, il s'agira alors de développer une chaîne de raisonnement *dans* l'incertitude, depuis la description des structures spatiales du peuplement et de ses dynamiques jusqu'à la modélisation des « passés possibles », dont les variations dépendent autant des critères en entrée que des niveaux spatio-temporels et d'incertitude mobilisés pour leur élaboration.

PARTIE III – « les passés possibles » : de l'exploration à la modélisation *floue* des configurations spatiales et du peuplement possibles

La vérité est que, plus nos horizons s'élargissent, plus notre passé se dérobe.

Charles-Pierre PEGUY (1996)

Chapitre 7: Régionalisation *floue* des configurations spatiales du peuplement et de leur dynamique temporelle

Chapitre 8 : Evaluation et modélisation des systèmes d'occupation du sol possibles dans un contexte d'incertitude forte

Chapitre 7 : Régionalisation *floue* des configurations spatiales du peuplement et de leur dynamique temporelle

INTRODUCTION

L'objectif de cette nouvelle étape de l'étude consiste à explorer une portion plus restreinte de la base de données, dont les limites spatiales et temporelles ont été choisies à partir des résultats des traitements de la partie II, et de tenter d'en dégager les structures et les dynamiques spatio-temporelles. Cette tentative de description des modes locaux d'occupation du sol et de ses variations dans le temps est ainsi envisagée à la fois comme une fin, dans le but d'alimenter la discussion et de proposer des éléments d'hypothèse sur les peuplements considérés, mais également comme un moyen, puisqu'elle permettra, dans un dernier temps, d'élaborer des modèles *flous* évaluant les possibilités d'occupation du sol des zones non prospectées. Le point de vue testé et défendu dans cette partie de l'étude consiste à évaluer les impacts des divers niveaux spatiaux, temporels et d'incertitude relatifs aux données mobilisées en termes d'hypothèses et de modélisation. Notre raisonnement est ainsi toujours résolument exploratoire : il s'agit, par un enchaînement « du général au particulier » de méthodes et de traitements explorant les divers niveaux de l'espace et du temps dans toute l'incertitude qu'ils recèlent, de tenter une reconstruction des structures et des dynamiques spatio-temporelles de la zone de peuplement envisagée.

1. CARACTERISTIQUES DE LA ZONE ETUDIEE

1.1 Choix de la région spatio-temporelle d'étude

Afin de poursuivre notre cheminement exploratoire au fil des espaces, des temps, des données et des méthodes, et d'aborder des problématiques où les niveaux spatiaux, temporels et d'incertitude sont mobilisés dans des questionnements thématiques plus spécifiques, nous avons sélectionné une région spatio-temporelle à étudier plus finement : il s'agit de la zone Nord-Est (Figure 60), incluant la zone de prospection et de fouille des Marges Arides, et des régions du Jazr et de la zone d'Ebla, sur l'intervalle temporel situé entre -3600 et -1200 av. J.-C (*temps* 1A, 1Ba, 1Bb et 1Ca).

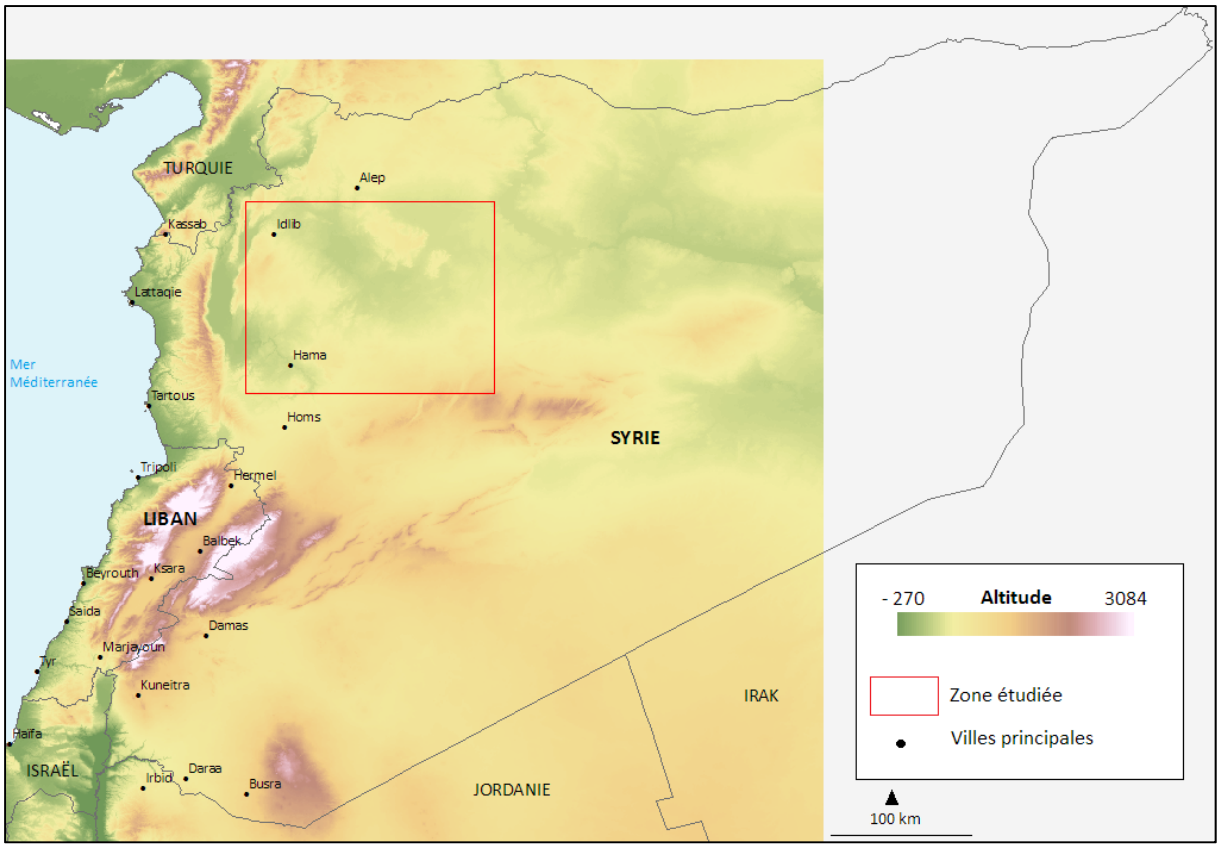


Figure 60 - Zone étudiée dans la partie III

Les raisons de ce choix sont multiples :

- La datation étant moins précise sur cet intervalle temporel, comportant beaucoup d'UNAR « indéterminées », les enjeux sur la compréhension des structures et des dynamiques spatiales des systèmes de peuplement sont plus élevés ici que pour les périodes historiques, par exemple, où les périodes sont plus courtes et la résolution pour une évaluation du changement plus fine. En outre, cet intervalle permet également de se confronter aux questionnements soulevés dans les parties précédentes sur les niveaux temporels à mobiliser et leurs répercussions sur les analyses, modèles et conclusions que l'on en tire.
- Cet intervalle temporel est traversé par un épisode d'aridification du climat, l'évènement 4.2.B. P. (2200 av. J.-C.), souvent considéré par les archéologues comme un fort moteur de changement, voire d'effondrement de systèmes de peuplement (Weiss, Bradley 2001 ; Braemer et al. 2014). Il s'agit de voir si nos données nous permettent un quelconque discours sur d'éventuelles traductions spatiales de l'évènement.
- La zone sélectionnée est steppique : à la différence des sites situés dans la vallée de l'Oronte, toute proche, et dont l'agencement spatial linéaire suit de toute évidence le linéaire de la vallée, l'organisation spatiale des sites ne semble pas a priori suivre un facteur

environnemental majeur à échelle régionale. La recherche exploratoire des structures spatiales par des outils morphologiques et géostatistiques prend donc ici tout son sens.

1.2 Objectifs et moyens

Nous avons choisi de limiter notre étude à la prise en compte des sites d'habitat, afin de ne pas associer des cadres interprétatifs trop différents (mais néanmoins probablement complémentaires). Nous ne raisonnons donc désormais plus en termes d'UNAR mais en termes de sites archéologiques. En effet, c'est désormais l'occupation du sol, ses modes et ses évolutions qui nous intéressent, et c'est donc le site en tant que lieu d'habitat qui est envisagé.

Nos objectifs de départ sont, une fois encore, très généraux et dépourvus d'hypothèse majeure, du point de vue thématique. La démarche adoptée consiste en effet à interroger l'espace sous des angles divers et à se laisser guider au fil des traitements par les interrogations, les surprises ou même les régularités qui apparaissent dans les résultats (temporaires). Cette étude constituant de plus un « premier pas » d'analyses spatiales sur la zone et la période considérée, les orientations de notre recherche sont ainsi guidées uniquement par des questionnements et des enjeux de nature méthodologique forts.

Ces enjeux sont multiples :

- Conserver et tester au fil des traitements et du raisonnement les divers niveaux d'information identifiés dans la partie précédente. L'objectif est d'évaluer l'impact de la prise en compte successive de ces divers niveaux d'information sur les résultats des traitements et les orientations thématiques et méthodologiques qu'ils alimentent. Ces niveaux d'information sont de diverses natures :
  - ⇨ **Enjeux spatiaux** : nous sommes ici dans un contexte où l'absence de divisions administratives de l'espace doit nous conduire à nous questionner sur les niveaux spatiaux à considérer. En effet, si la géoprospective par exemple, peut se baser sur un jeu d'échelles de type commune-département-région pour observer le changement et en établir des profils, nous devons ici tenter une régionalisation des phénomènes afin de dépasser le carcan des échelles les plus communément mobilisées en archéologie: celle du site, et celle de la zone d'étude régionalisée sur des critères naturels (zones d' « attractivité » ou de « répulsivité » par exemple) ou historiques. Nous postulons que, parallèlement à ces démarches orientées « environnement » ou « histoire », une régionalisation empirique basée sur les types de structures spatiales détectées au sein de la zone d'étude par la répartition des sites archéologiques peut éclairer la problématique des niveaux spatiaux à

mobiliser : bien plus qu'une fin, cette démarche de régionalisation sur la base des structures spatiales est ainsi envisagée comme un moyen. La diversité des niveaux spatiaux s'exprimera également dans l'exploration de la zone par l'outil du variogramme, qui sera lui-même calculé à partir de grilles différentes plaquées sur la zone étudiée : deux tailles seront testées, une grille aux mailles d'1 km de côté, et une autre aux mailles de 3 km de côté.

⇨ **Enjeux temporels** : le choix des niveaux temporels à mobiliser est directement lié aux niveaux de précision présentés précédemment dans le système de périodes et de « sous-périodes », et à la quantité d'information que celles-ci expriment.

La frise la plus à gauche sur la Figure 61 indique le nombre de sites d'habitat (fiables et non fiables confondus) liés à chaque période de la chronologie dans l'intervalle étudié. Cette figure mentionne également le regroupement en « temps » effectué dans la partie 2 de cette étude.

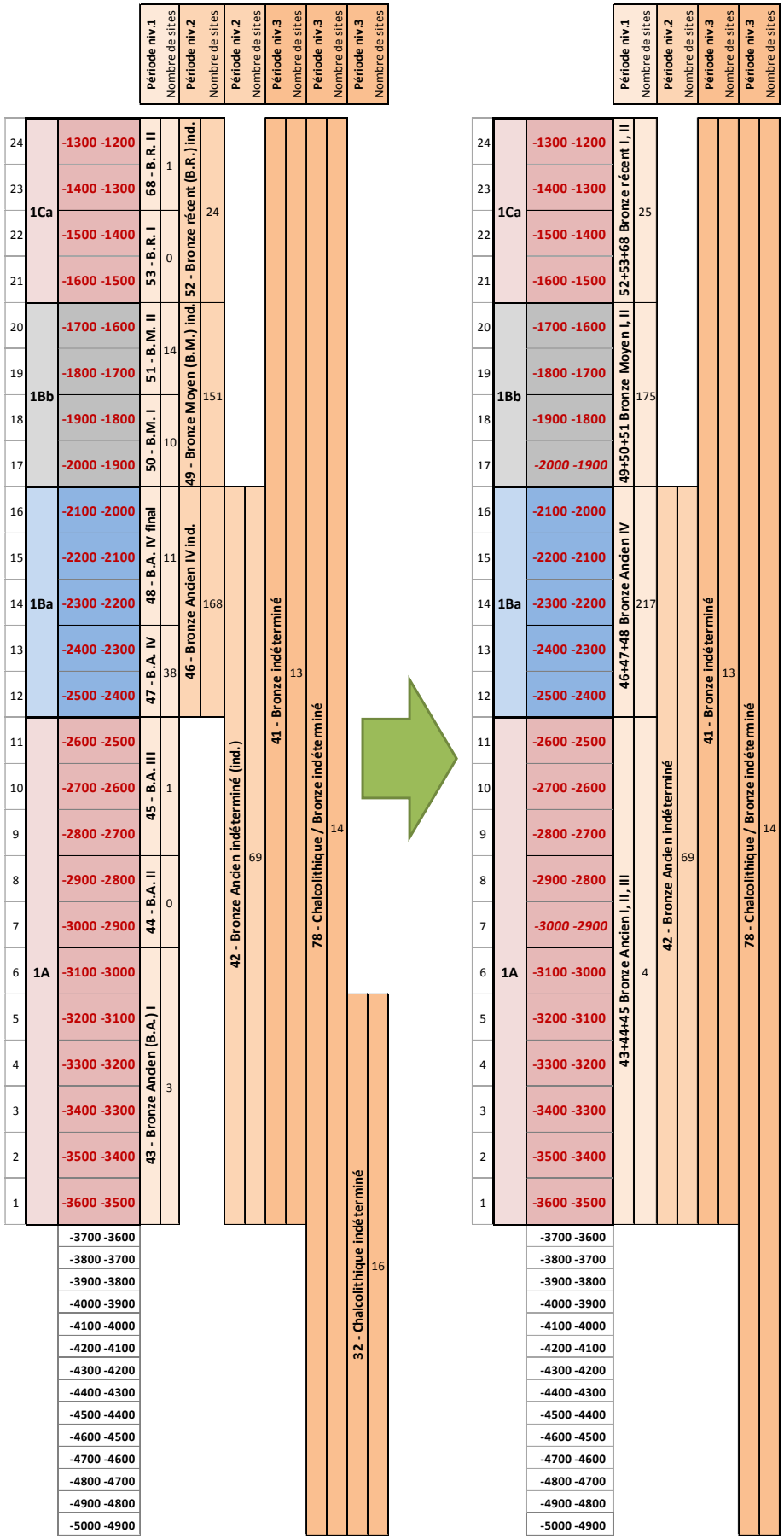
On constate une répartition fort inégale des sites. Mais surtout, un niveau de précision certes élevé mais bien peu renseigné : les sous-périodes les plus précises contiennent bien moins de sites que les niveaux de sous-périodes plus englobants. Dans un but purement technique (la plupart des sous-périodes disposent d'un nombre bien trop faible de sites pour pouvoir réaliser des analyses spatiales ou géostatistiques qui soient significatives), nous avons ainsi choisi de considérer les phénomènes à l'échelle des « temps » identifiés plus tôt, et correspondant en fait au second niveau de sous-périodes de la frise chronologique. La frise la plus à droite sur la Figure 61 indique la quantité de sites associée à chaque temps considéré (somme des sites des périodes de niveau 1 et 2). En outre, les sites du Chalcolithique indéterminé n'étant potentiellement présents que sur les 500 premiers siècles de l'intervalle étudié, et vu le niveau de précision choisi, nous avons éliminé ceux-ci de nos données, ces sites ayant statistiquement plus de probabilités d'appartenir aux 14 siècles situés hors de notre intervalle qu'aux 5 premiers nous concernant.

Il convient désormais de s'interroger sur le *temps* 1A. En effet, seuls quatre sites d'habitat sont identifiables de cette période. Si cela peut, d'un côté, témoigner d'une très faible occupation de la zone durant les siècles précédant le *temps* 1Ba, cela peut également être le résultat d'une attribution chronologique des sites peu précise : en effet, soixante-neuf sites sont considérés comme datant du « bronze ancien indéterminé », et peuvent être répartis sur les seize premiers siècles de l'intervalle temporel étudié. Ces sites appartiennent-ils au *temps* 1Ba ou précèdent-ils celui-ci (*temps* 1A) ? Dans la mesure où il n'est pas possible de

les individualiser, un niveau temporel supplémentaire nommé 1A+1Ba sera mobilisé, correspondant aux sites 1A et 1Ba, ainsi qu'aux sites « indéterminés ».

Les sites correspondant aux périodes numérotées 41 (Bronze indéterminé) et 78 (Chalcolithique/Bronze indéterminé) ne peuvent quant à eux rien nous apprendre sur la dynamique de changement de l'occupation du sol, dans la mesure où leur probabilité d'appartenance couvre tout l'intervalle étudié (plus les quatorze siècles précédents pour le chalcolithique/Bronze indéterminé). Ceux-ci peuvent cependant nous donner un renseignement purement spatial sur l'étendue des zones occupées sur l'ensemble de l'intervalle étudié. Ce niveau temporel correspondant à l'ensemble des sites de l'intervalle étudié (c'est-à-dire, en termes de chronologie archéologique, la totalité de l'âge du Bronze) ne seront donc mobilisés que dans cette optique.

Figure 61 - Répartition des données au sein des temps sélectionnés pour l'étude.



La Figure 62 résume ainsi les divers niveaux temporels d'observation qui seront mobilisés dans cette partie de l'étude.

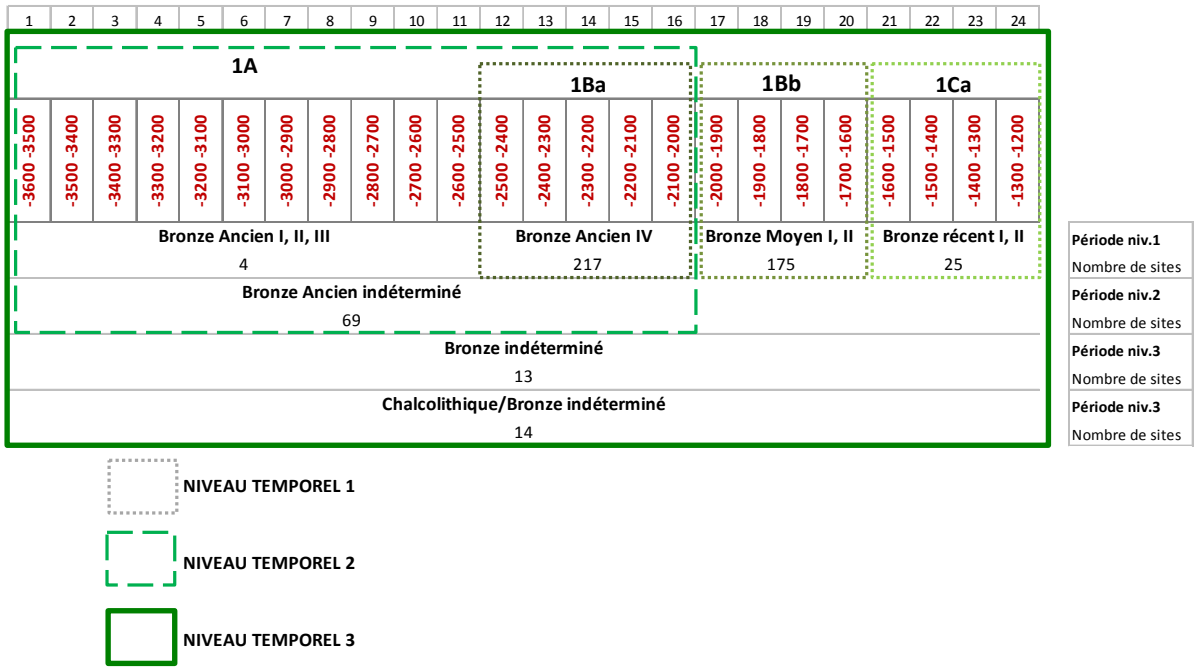


Figure 62 - Les trois niveaux temporels matérialisés par les données

⇨ **Enjeux d'incertitude :** Nous l'avons vu, la fonction de nombreuses UNAR est répertoriée comme « indéterminée ». Or, c'est la localisation des sites d'habitat qui nous occupe ici. Il s'agit donc de déterminer ce que peuvent apporter ces UNAR « indéterminées » à la recherche des structures spatiales plutôt que de les écarter purement et simplement, tout en gardant leur incertitude à l'esprit - et en la prenant en compte dans les analyses. Décliner les « occupations indéterminées » ayant pu, en fonction de la morphologie du site considéré, occuper des fonctions d'habitat, en différents niveaux d'incertitude a été réalisé en s'appuyant sur le tableau 10, décrit dans la partie 2. L'attribution des niveaux de fiabilité à chaque UNAR ayant pu avoir des fonctions d'habitat est décrite dans le Tableau 21:

Tableau 21 - Passage des pourcentages de probabilité pour que l'UNAR témoigne d'une fonction d'habitat à six indices de fiabilité.

% de probabilité pour que l'UNAR témoigne d'une fonction d'habitat	Indice de fiabilité
100%	5
80%	4
75%	3
50%	2
33%	1
Non connu	0

Nous avons cependant désormais choisi de ne plus raisonner en termes d'UNAR dans cette partie de l'étude mais en termes de sites archéologiques. Chaque site d'habitat potentiel s'est donc vu attribuer le niveau de fiabilité quant à ses fonctions d'habitat correspondant au niveau le plus élevé des UNAR qu'il contient. Ainsi, un site comportant au moins une UNAR de niveau 5 sera considéré comme un site d'habitat fiable au niveau 5, quel que soit le niveau de fiabilité des autres UNAR qu'il contient.

Cette nouvelle répartition de la donnée s'effectue comme suit (Figure 63) :

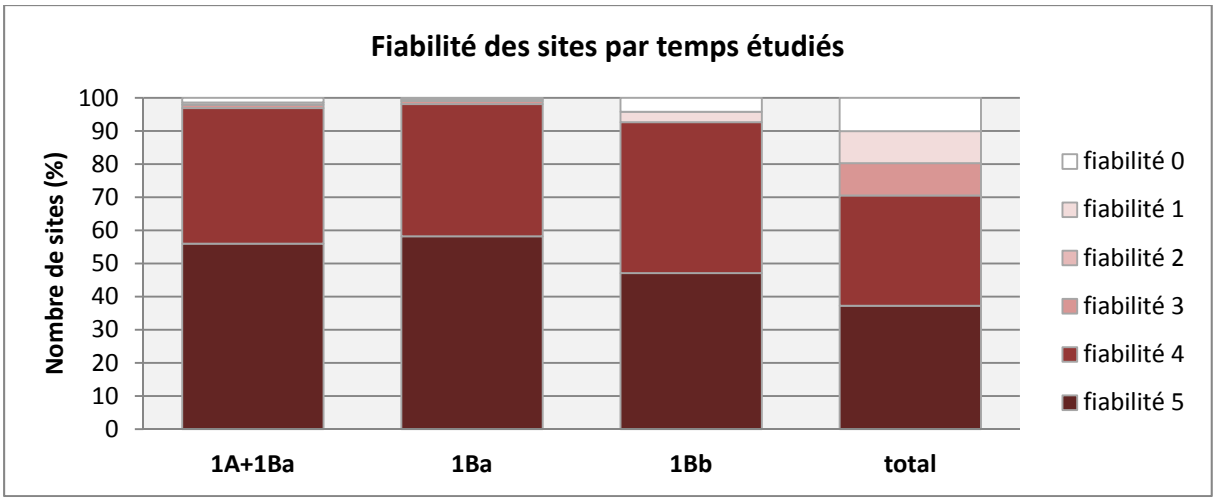


Figure 63 - Nombre de sites et leurs six niveaux de fiabilité par *temps* étudiés

On peut constater que la plupart des sites archéologiques présentent des niveaux de fiabilité de 5 ou 4, très peu d'entre eux ne se référant aux niveaux inférieurs. Nous avons donc finalement choisi, afin de ne pas s'embarrasser de trop nombreux niveaux d'incertitude au poids si faible dans les données, de regrouper les sites en deux classes « fiable » (fiabilité niveau 5) et « non fiable » (autres niveaux de fiabilité) (Figure 64).

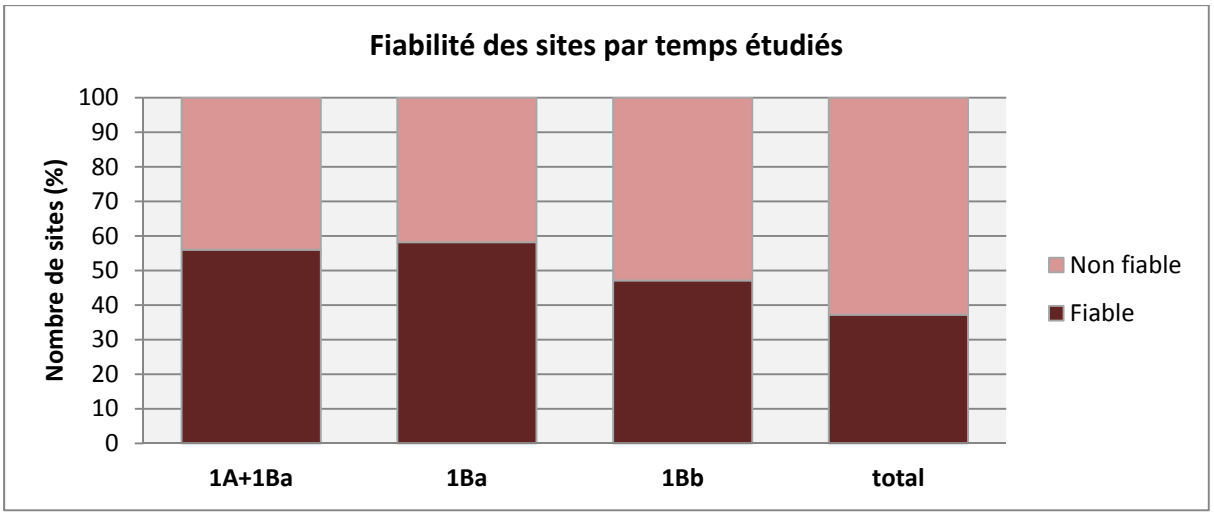


Figure 64 - Nouvelle répartition des sites en deux classes de fiabilité, par *temps* étudiés.

En outre, il est à nouveau indispensable de mobiliser la carte des niveaux d'intensité de la prospection, ramenée à la zone étudiée uniquement. Il s'agit de la carte des niveaux de prospection présentée précédemment, mais découpée en mailles d'1 km et de 3 km de côté. Chaque maille s'est vue attribuer la moyenne des indices de prospection contenus, et six classes définies de manière à respecter le plus possible la carte initiale ont été calculées (Figure 65).

Cette information doit nous conduire à envisager la localisation des sites avec prudence : si l'intensité de la prospection ne remet pas en cause la localisation des sites existant, cela peut avoir un impact dans la relation qu'entretiennent les sites : si dans les zones très bien prospectées, les chances sont bonnes pour qu'une très grande partie des sites conservés ait été découverte et répertoriée, l'information concernant l'espacement des sites dans les zones moyennement ou peu prospectées peut être erronée. Des sites interstitiels peuvent en effet ne pas avoir été répertoriés, et nous donner une impression de plus fort éloignement des sites les uns des autres que dans les zones bien prospectées.

La démarche adoptée consistera ainsi à explorer de nouvelles perspectives en termes de traitement, de visualisation et d'intégration de l'incertitude thématique (fiabilité de l'information) spatiale (divers niveaux d'intensité de la prospection) et temporelle (précision de la localisation des sites dans le temps), afin qu'elle puisse servir et non plus desservir l'étude des modes d'occupation du sol des systèmes de peuplement passés et de leurs changements spatio-temporels.

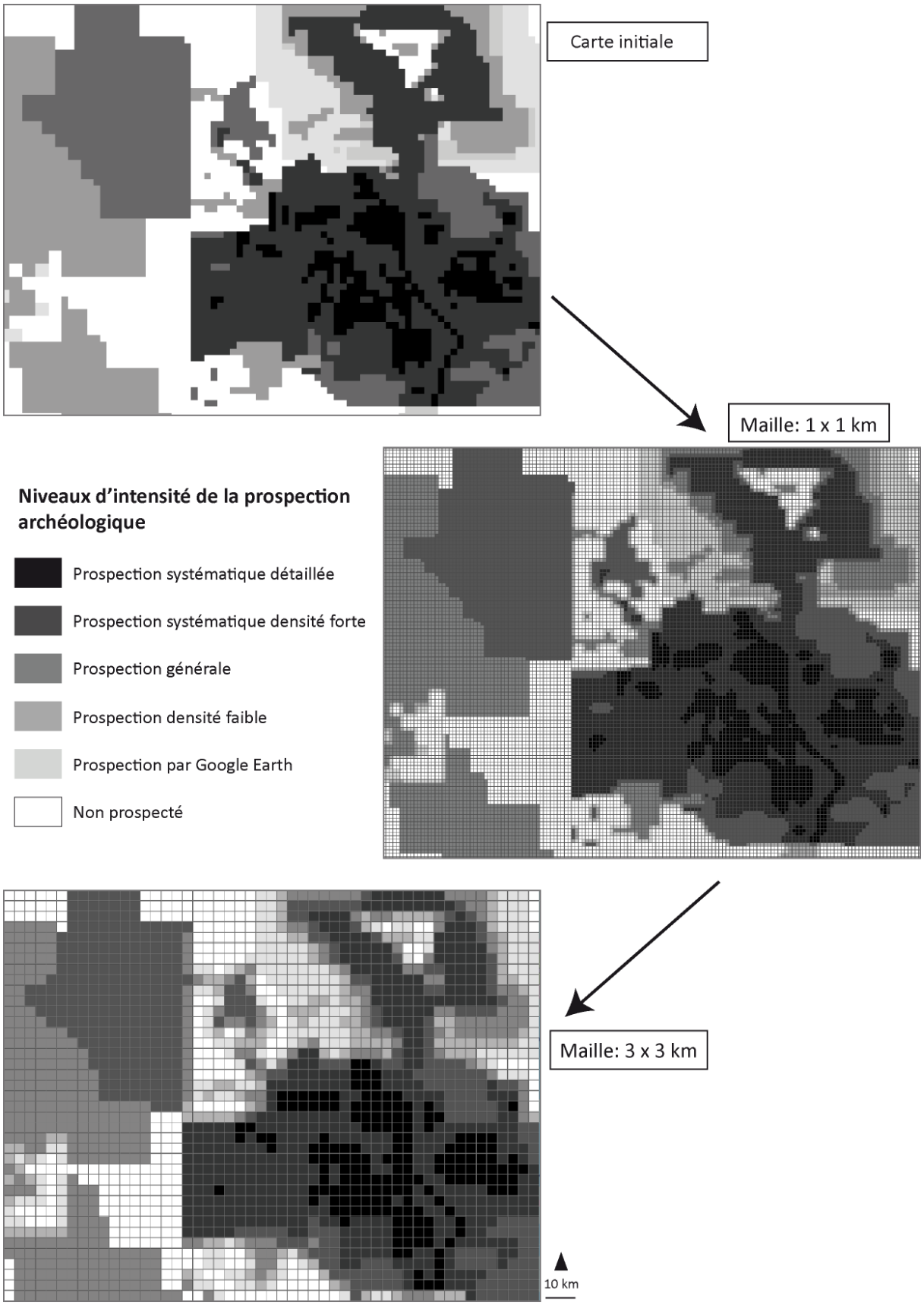


Figure 65 - Passage de la carte initiale des niveaux d'intensité de la prospection archéologique, à des grilles aux mailles d'1 km et de 3 km de côté.

2. LA RECHERCHE EXPLORATOIRE DES MODES ET DYNAMIQUES D'OCCUPATION DU SOL

2.1 Détection des grandes structures spatio-temporelles par la variographie

2.1.1 Rappel sur la détection des structures spatiales par la variographie

Comme cela a déjà été mentionné dans la partie 1, le variogramme est une courbe permettant de représenter le degré de continuité spatiale d'un phénomène (Matheron, 1963). Celui-ci « permet de savoir dans quelle mesure ce qui se passe en un point ressemble ou non, en moyenne, à ce qui se passe dans son entourage distant de h ; il mathématise la notion d'influence d'un échantillon : si l'influence d'un point sur son voisinage décroît très rapidement quand on s'éloigne de ce point, la croissance du variogramme à l'origine est très rapide » (Guillaume, 1977).

La variable régionalisée notée, f_i est définie en chaque point i du champ. « Le variogramme au pas h est la valeur moyenne du carré de l'écart entre les implantations de la variable, distantes de h (h étant un vecteur donné) » (Dauphiné, Voiron-Canicio, 1988). Le variogramme 2γ(h) est ainsi défini par la formule :

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n-h}\sum_{i=1}^{n-h}(f_{i+h} - f_i)^2$$

où N-h est le total des couples de points d'appui mobiles.

Le variogramme est, dans notre démarche, un outil privilégié pour interroger l'espace en amont d'une chaîne de raisonnement exploratoire, pour son aptitude à simplifier et ordonner la tendance, les structures cachées, les discontinuités et l'anisotropie des phénomènes, tout en prenant en compte leurs composantes structurale et aléatoire, ainsi que les échelles de structures. Il constitue une première approche permettant d'orienter les questionnements et les traitements à venir et de déterminer les niveaux d'étude pertinents auxquels les réaliser.

2.1.2 Mode de réalisation des variogrammes

Les variogrammes nous permettent ainsi d'observer l'évolution de la dépendance spatiale entre les sites, ou plutôt, entre la quantité de sites par maille de taille 1 et de taille 3, pour chaque temps présenté dans la Figure 62. La Figure 66 montre quant à elle les types de données sur lesquelles se base le calcul des variogrammes : la valeur de chaque maille correspond au nombre de sites relevés pour le temps considéré (1Ba, 1A+1Ba, 1Bb ou la totalité de l'intervalle étudié), selon que

l'on considère les sites d'habitat fiables uniquement (grilles à gauche sur la Figure 66) ou la totalité des sites quel que soit leur niveau de fiabilité (grilles à droite sur la Figure 66).

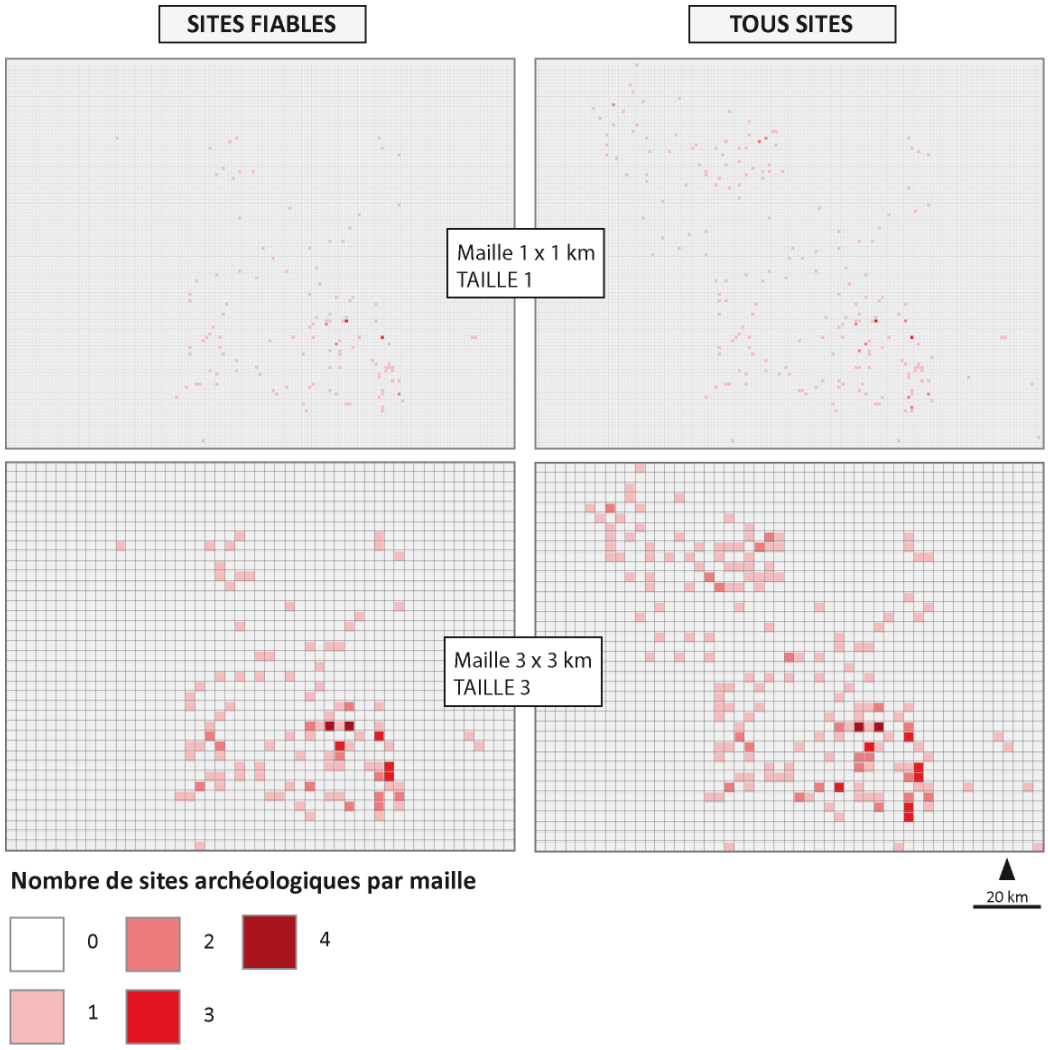


Figure 66 - Types de grilles à la base de la réalisation des variogrammes

Nous avons choisi d'introduire dans la recherche des structures spatiales l'incertitude relative à la fonction d'habitat des sites : les densités relevées pour construire le variogramme et donc entrant en jeu dans la recherche des structures spatiales dépendent en effet du nombre de sites étant considérés comme de l'habitat. Il s'agit donc, en calculant les variogrammes à partir des sites à la fonction d'habitat la plus avérée, puis en introduisant dans ce calcul les sites moins fiables de ce point de vue, de trouver une « voie du milieu » permettant à la fois de ne pas écarter totalement ces sites de l'analyse, leur localisation pouvant nous apporter de précieux renseignements dans la recherche des structures spatiales auxquelles ils participent peut-être, mais aussi de ne pas leur conférer le même poids dans l'analyse que les sites plus fiables. Leur intégration doit donc se faire au regard des structures spatiales détectées par l'étude de la localisation des sites fiables, afin

d'observer en quoi leur introduction dans l'analyse permet de renforcer ces structures et les hypothèses qui les accompagnent, ou, au contraire, d'apporter de nouvelles hypothèses à des échelles diverses. Ainsi, les variogrammes ont été calculés successivement sur les sites fiables uniquement (on privilégie alors la qualité de l'information dans la détection des structures spatiales) puis sur la totalité des sites, fiables et non fiables (on privilégie alors la quantité d'information).

Il convient de préciser que les zones non prospectées n'ont pas été prises en compte dans le calcul des variogrammes, et considérées comme « hors champ ». En effet, les « vides » (c'est-à-dire les mailles dont la valeur est 0) comptent dans le calcul du variogramme puisqu'elles participent à l'élaboration des structures spatiales. Les zones non prospectées ne doivent donc pas y figurer, les « vides » qu'elles créent relevant d'un artefact de la collecte des données et non de potentielles structures spatiales particulières à interroger.

En outre, le *temps* 1Ca n'a, lui non plus, pas pu être été intégré dans l'analyse, vu le trop faible nombre de sites qu'il comporte.

Afin de pouvoir comparer les variogrammes entre eux, ceux-ci ont été normés en divisant chacune des valeurs de $2\gamma(h)$ par le nombre total de données ayant permis de les élaborer (c'est-à-dire, pour chaque graphique, le nombre total de sites au temps donné).

La Figure 67 résume les divers niveaux spatiaux, temporels et d'incertitude mobilisés dans le calcul des variogrammes, ainsi que ses objectifs majeurs.

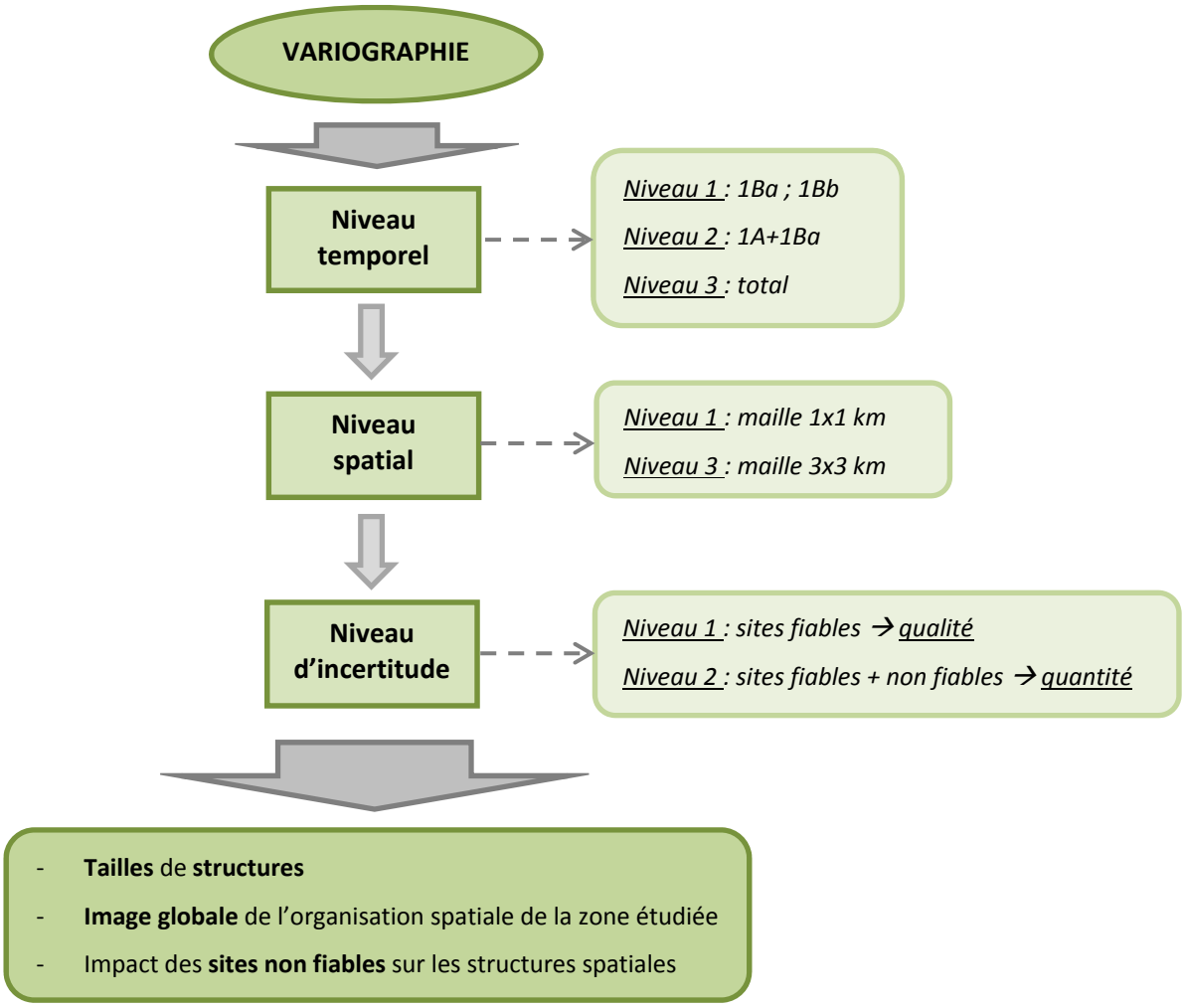


Figure 67 - Les différents niveaux temporels, spatiaux et d'incertitude matérialisés dans le calcul des variogrammes

2.1.3 Interprétation des résultats

Les variogrammes ont été calculés dans deux directions, Nord-Sud et Est-Ouest, dans le but de détecter d'éventuels phénomènes d'anisotropie (Figure 68 à Figure 75).

On constate que le profil des variogrammes réalisés à partir de la grille de taille 1 (Figure 68, Figure 69, Figure 72 et Figure 73) oscille bien plus que ceux réalisés à partir de la maille de taille 3 (Figure 70, Figure 71, Figure 74 et Figure 75), mais que la tendance reste similaire quelle que soit la taille de la grille. Les variogrammes de taille 1 mettent ainsi en évidence une structure à une échelle, correspondant certainement à la taille de la maille, trop réduite pour mettre en évidence des structures à des échelles supérieures. Les petits mais fréquents « effets de trou » sont certainement créés par les mailles vides qui entourent la plupart des mailles occupées par des sites. Les variogrammes de taille 3 sont quant à eux lissés par l'agrandissement des mailles

(passage de mailles de 1 km² à 9 km²), englobant les mailles « pleines » et les mailles « vides » proches, et mettent donc plus en évidence les échelles de structures supérieures. Cette taille de maille met ainsi en évidence les grandes tendances tout en accentuant les différenciations.

On constate également que les variogrammes calculés dans la direction Nord-Sud stagnent globalement autour des mêmes valeurs : il semblerait ainsi que la dépendance spatiale ne s'applique pas dans cette direction, mais dans la direction Est-Ouest, où les profils des divers variogrammes semblent bien plus significatifs.

Le commentaire qui suit s'attachera donc préférentiellement aux variogrammes de taille 3 dans la direction Est-Ouest.

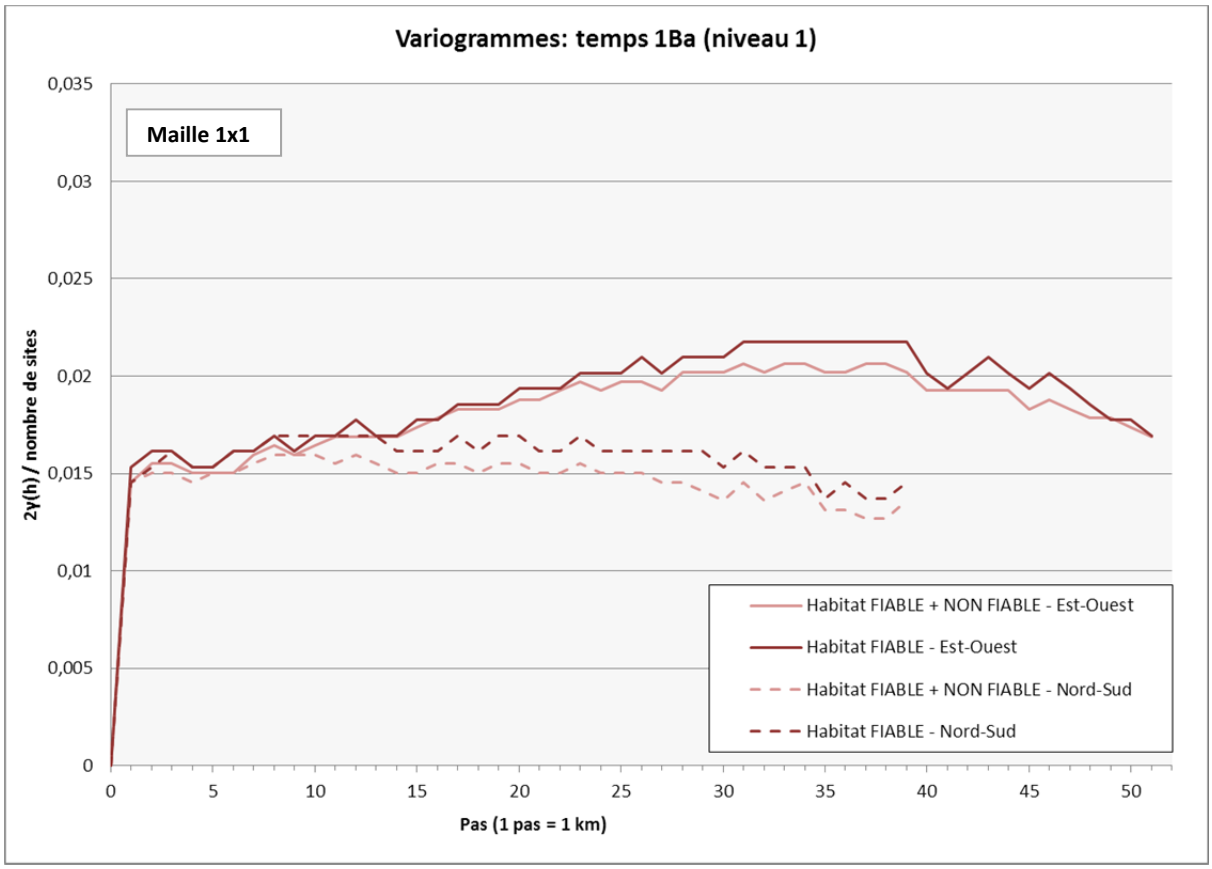


Figure 68 - Variogrammes directionnels pour le *temps* 1Ba à partir de la maille 1x1 km.

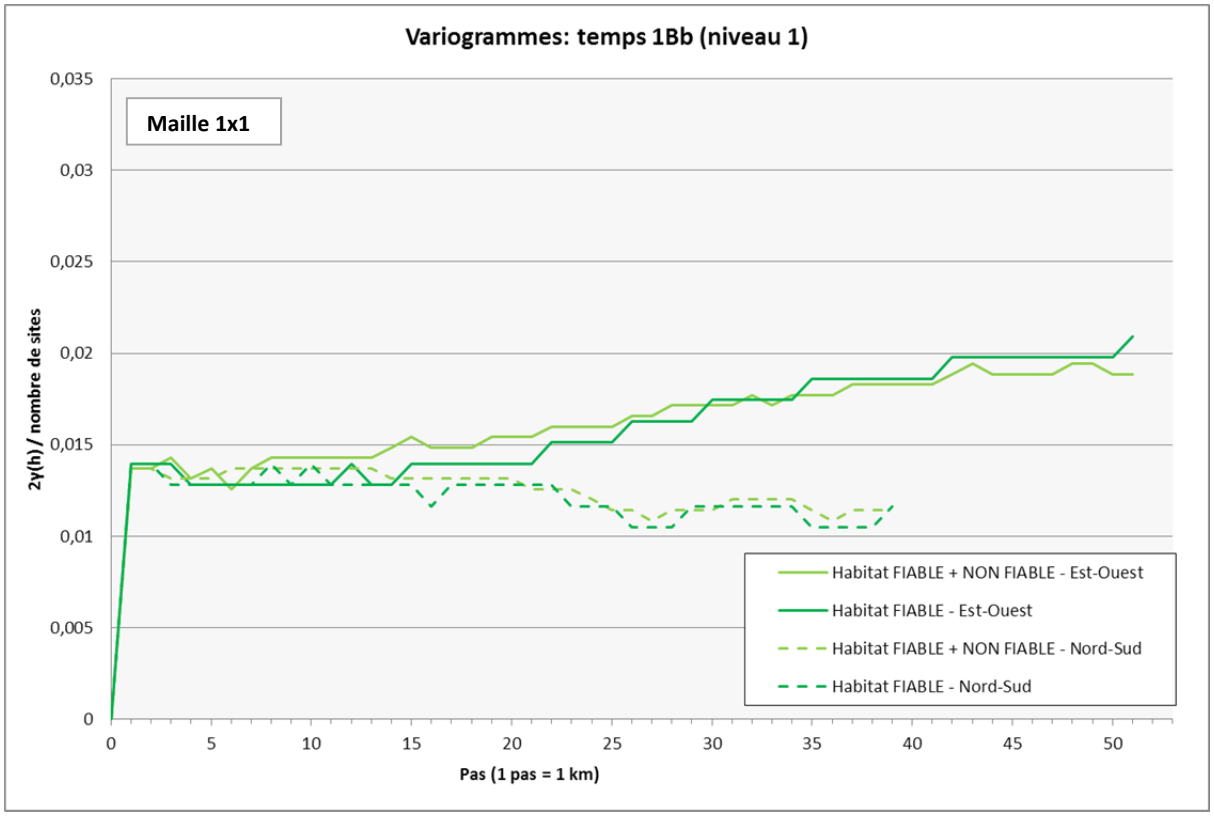


Figure 69 - Variogrammes directionnels pour le *temps* 1Bb à partir de la maille 1x1 km.

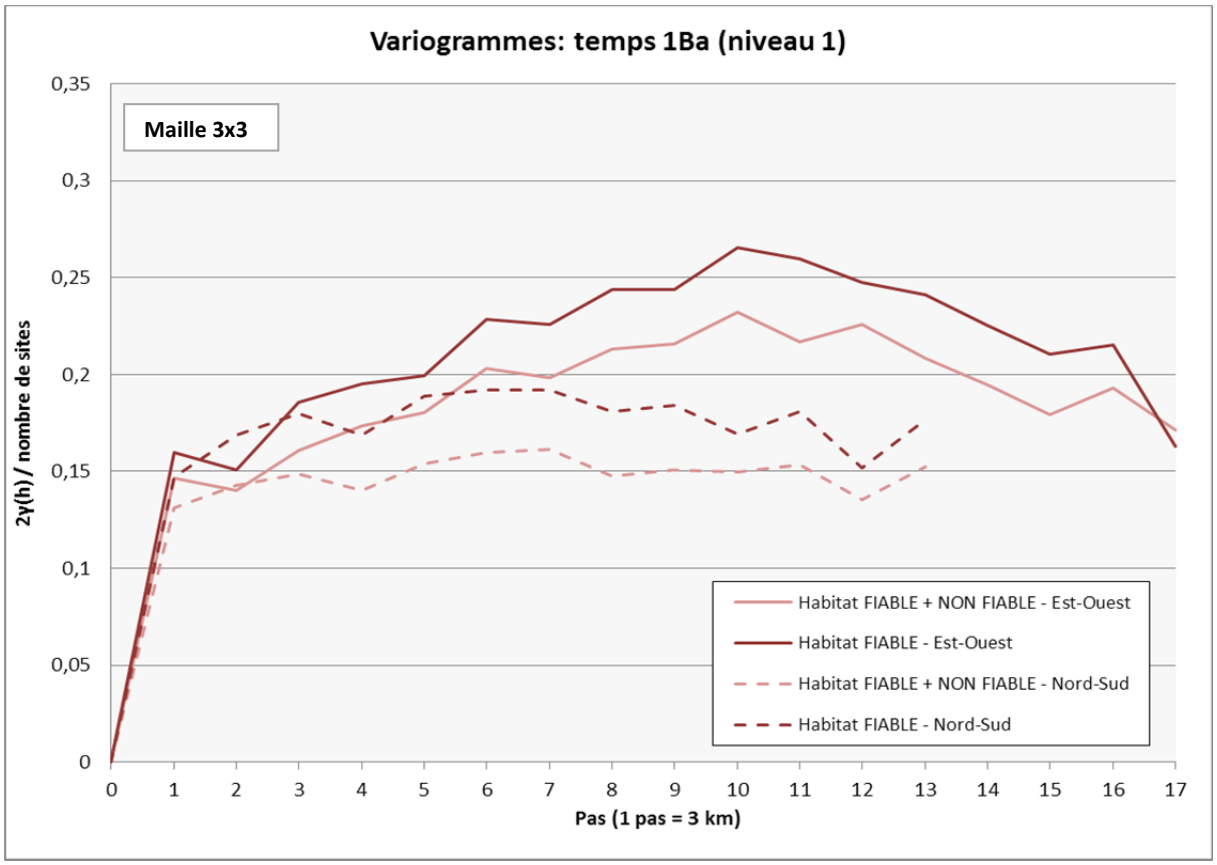


Figure 70 - Variogrammes directionnels pour le *temps* 1Ba à partir de la maille 3x3 km.

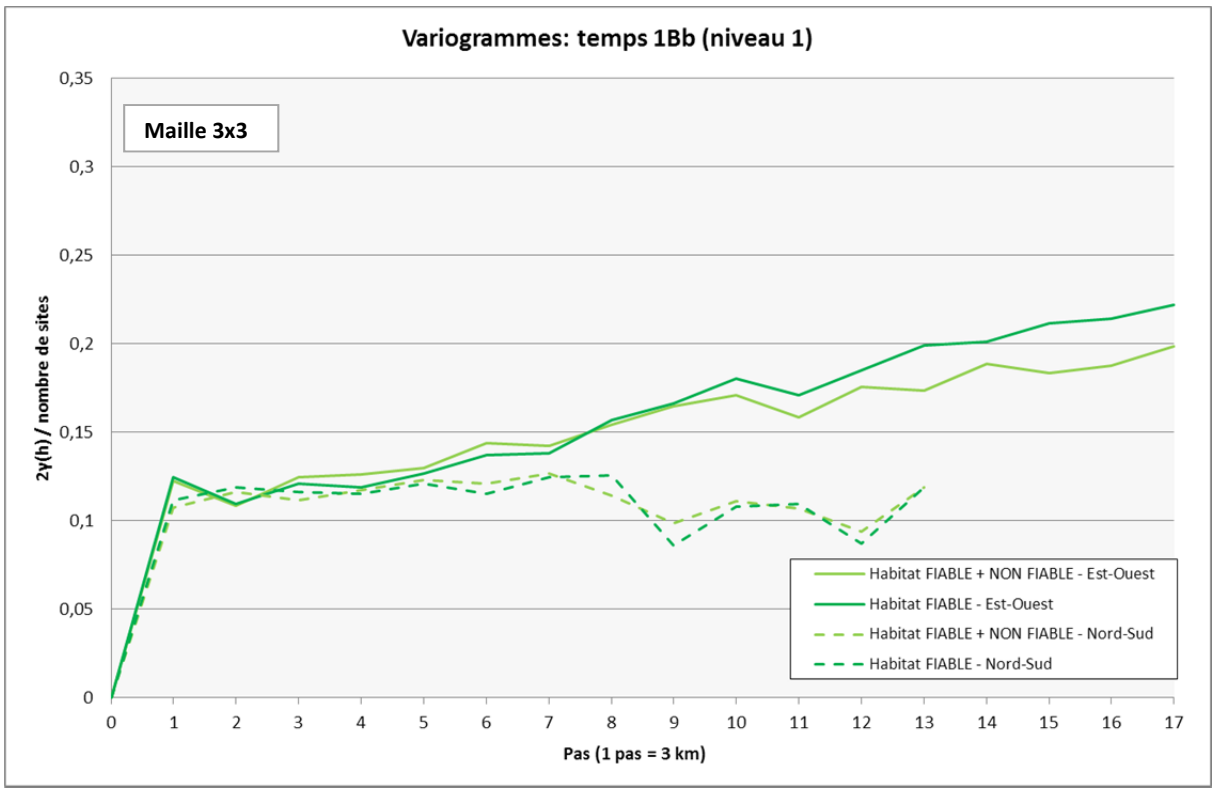


Figure 71 - Variogrammes directionnels pour le *temps* 1Bb à partir de la maille 3x3 km.

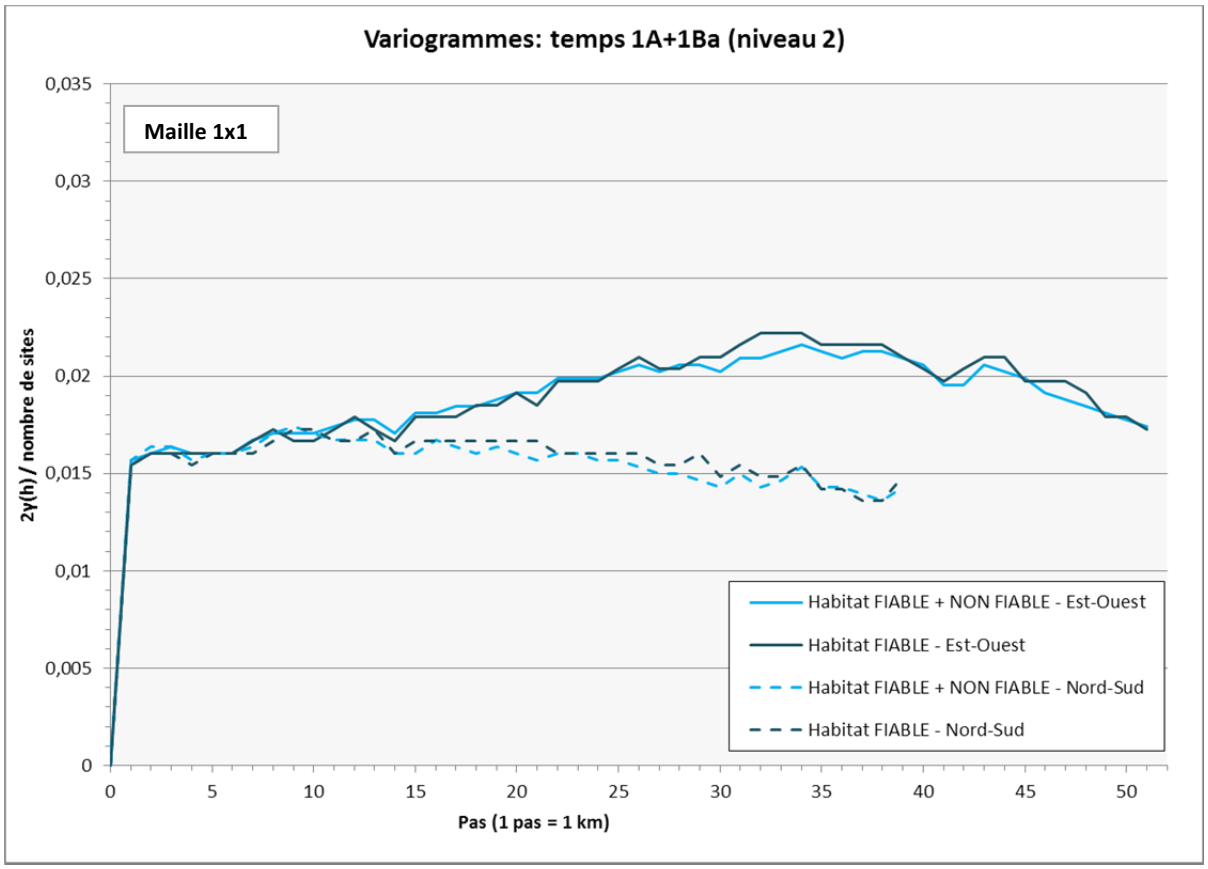


Figure 72 - Variogrammes directionnels pour le *temps* 1A+1Ba à partir de la maille 1x1 km.

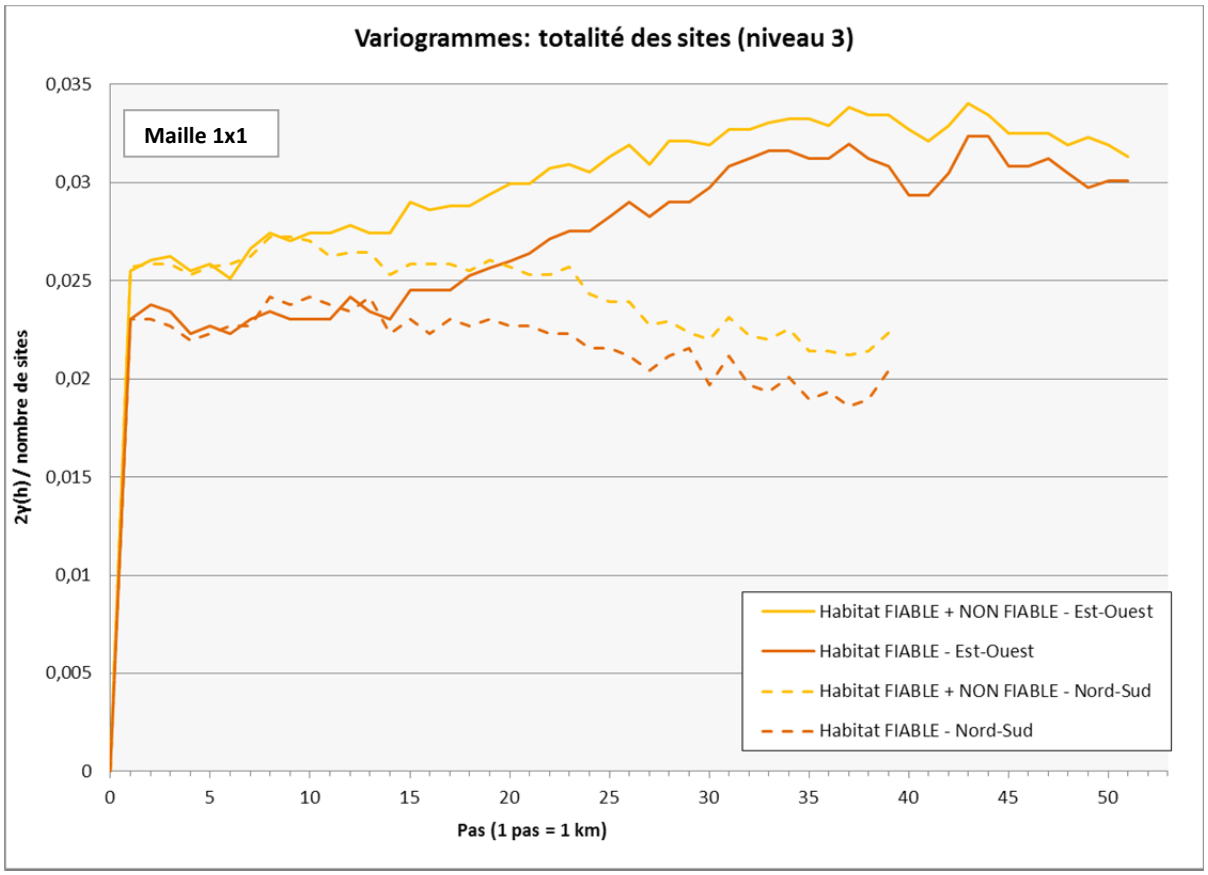


Figure 73 - Variogrammes directionnels pour la totalité des sites à partir de la maille 1x1 km.

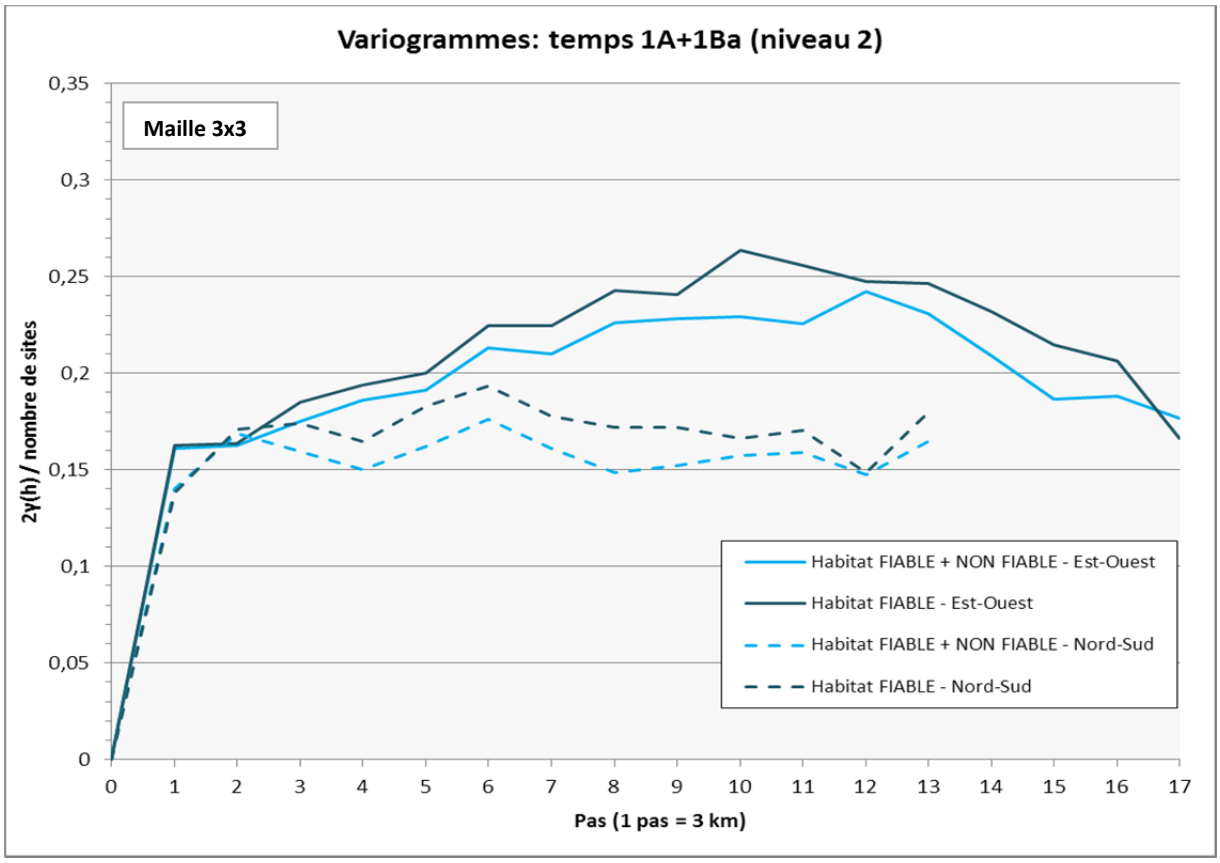


Figure 74 - Variogrammes directionnels pour le *temps* 1A+1Ba à partir de la maille 3x3 km.

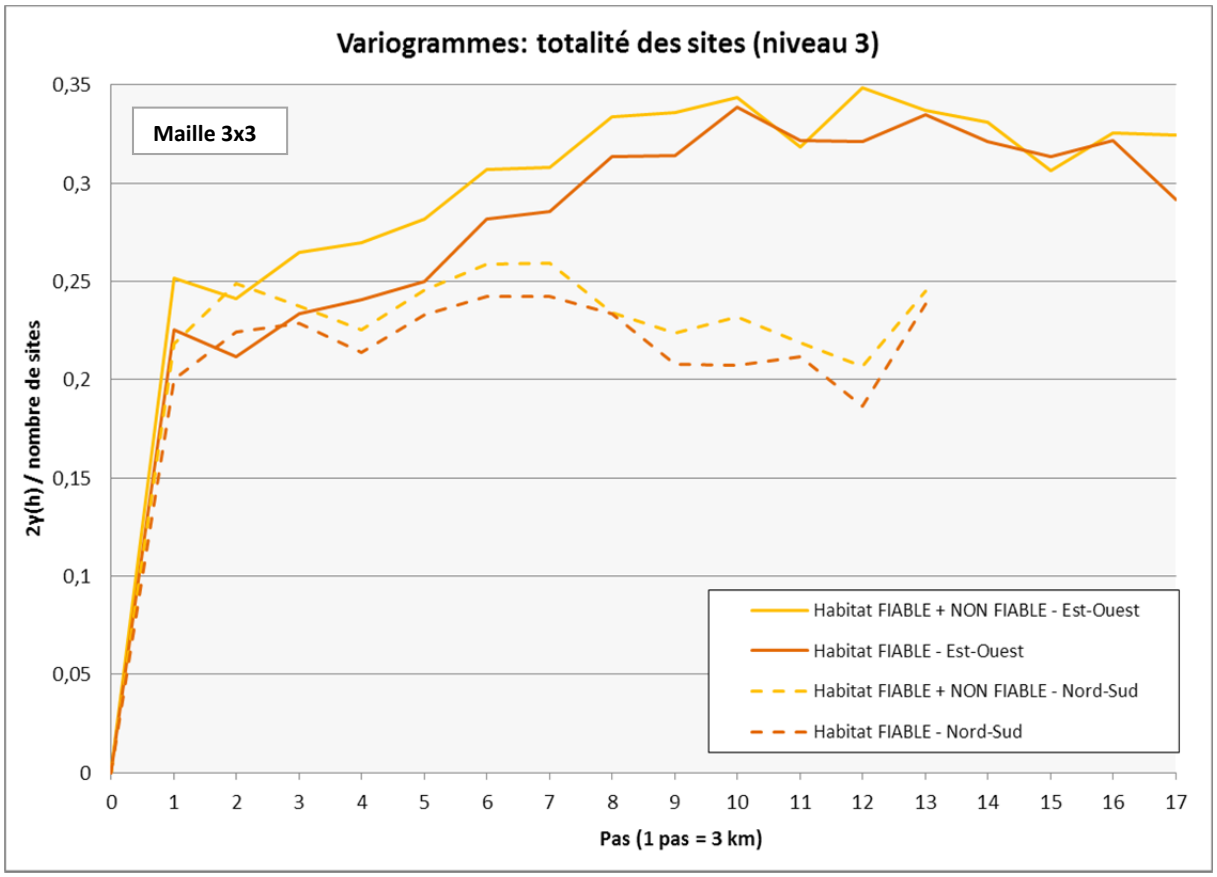


Figure 75 - Variogrammes directionnels pour la totalité des sites à partir de la maille 3x3 km.

Les premiers pas des variogrammes 1Ba (Figure 70) mettent en évidence des différenciations spatiales plus ou moins accusées selon la direction retenue. Dans la direction Nord-Sud, le variogramme signale une seule taille de structure de portée 9 km indiquant que les sites sont distants en moyenne de 9 km dans cette direction. Au-delà, le variogramme oscille autour des mêmes valeurs, signe d'une indépendance spatiale entre les points. En revanche, les différenciations sont plus fortes dans la direction Est-Ouest. Les courbes décrivent par ailleurs un emboitement de structure, 5 ou 4 niveaux -selon la fiabilité de l'habitat- apparaissent, et correspondent à des régionalisations de concentration de sites d'ampleur croissante. Le maximum de contrastes (pas 10) s'observe entre des zones situées en moyenne à 30km les unes autres. L'important effet de trou qui suit, signale l'existence de régions ayant sensiblement le même nombre de sites, distantes de plus de 50 km.

Les variogrammes du *temps* 1Bb (Figure 71) dépeignent une tout autre configuration spatiale : les différenciations spatiales ont globalement diminué. La direction Nord-Sud se caractérise par une seule échelle de structure de taille 6 km. Dans la direction opposée, les variogrammes sont non bornés. Après une première échelle de structure de taille 3 km, les courbes s'envolent sans atteindre de palier, indiquant que les différenciations vont croissant au fil des kilomètres.

Les variogrammes calculés pour la première partie de l'intervalle temporel étudié, mais au niveau temporel 2 (*temps* 1A+1Ba, Figure 74) ont un profil assez proche du *temps* 1Ba. Deux niveaux de structures apparaissent aux pas 2 et 8, dans la direction Nord-Sud. Les variogrammes calculés dans la direction Est-Ouest signalent d'autres régionalisations de plus grande ampleur, avec maximum de différenciations au pas 32 (96 km).

Cette structure se retrouve aussi globalement sur les variogrammes des Figure 73 et Figure 75 relatifs à la totalité de l'intervalle étudié (c'est-à-dire l'Âge du Bronze), avec des structures (et donc des différenciations) plus marquées.

<u>Ce que l'on peut retenir :</u>

- On préfèrera pour l'observation des phénomènes la grille de taille 3 à la grille de taille 1 : les variogrammes nous indiquent des structures spatiales de manière plus visibles et significatives à ce niveau d'observation, certainement plus approprié dans une optique de régionalisation de l'occupation du sol et du changement.
- Aux premiers pas, les structures spatiales détectées sont similaires pour tous les temps entre 3 et 9 km, les différenciations interviennent au-delà de cette distance ;

- La prise en compte des sites fiables uniquement, ou de la totalité des sites dans le calcul ne modifie pas considérablement les structures spatiales.

Si les variogrammes indiquent les structures moyennes existant à travers le champ d'étude, ceux-ci ne montrent pas en revanche pas les lieux précis où ces structures apparaissent : ainsi, bien que les premiers pas des variogrammes montrent des structures voisines quels que soient le *temps* et le niveau temporel étudiés, c'est-à-dire des « types » de configurations spatiales similaires, il est fortement possible que ces configurations se soient déplacées dans l'espace. C'est pourquoi il est désormais nécessaire d'observer les renseignements donnés par le variogramme spatialement, grâce à l'outil de géovisualisation.

2.2 Observation spatiale des indications données par les variogrammes

2.2.1 Diverses configurations de trajectoires spatio-temporelles et incertitude à l'échelle du site

Les variogrammes nous ont indiqué diverses échelles de structures et de changement de ces structures selon le temps, le niveau temporel, et le niveau d'incertitude des données introduits dans l'analyse. On souhaite désormais visualiser les modalités de ce changement, et son inscription spatiale.

Pour ce faire, on observe la représentation de chacun des sites de la zone aux trois temps étudiés : 1Ba ou 1A+1Ba, (selon la précision temporelle de l'information), 1Bb et 1Ca, ainsi que la fiabilité de l'information relative à la fonction d'habitat de ces sites. Vingt-deux combinaisons représentant les diverses trajectoires empruntées par les sites ont été relevées et visualisées sous forme de séquences, montrant leurs fluctuations dans le temps, mais aussi les fluctuations de la fiabilité de l'information qui les caractérise. Ces vingt-deux cas ont été reportés sur le Tableau 22, où ils sont classés dans l'ordre décroissant en fonction du pourcentage du nombre de sites concernés par chacun des cas. On peut ainsi voir les tendances majeures et les cas les plus isolés sur l'ensemble de la zone spatio-temporelle d'étude.

Tableau 22 - Les trajectoires temporelles des sites archéologiques et l'incertitude qui y est associée.

	1A+1Ba				
		1Ba	1Bb	1Ca	% de sites
Cas 1					23,1
Cas 2					14,6
Cas 3					13,1
Cas 4					11,5
Cas 5					8,4
Cas 6					8,1
Cas 7					7,2
Cas 8					5,3
Cas 9					4,0
Cas 10					4,0
Cas 11					2,2
Cas 12					1,2
Cas 13					1,2
Cas 14					0,6
Cas 15					0,6
Cas 16					0,3
Cas 17					0,3
Cas 18					0,3
Cas 19					0,3
Cas 20					0,3
Cas 21					0,3
Cas 22					0,3

Habitat fiable	
Habitat non fiable	

On peut ainsi constater que le cas le plus fréquemment rencontré sur la zone d'étude est le cas 1: il concerne les sites fiables uniquement présents au *temps* 1Ba (23,1% des sites sont concernés par cette configuration). Les cas suivants sont : des sites non fiables présents aux *temps* 1Ba et 1Bb (cas 2, 14,6% des sites), des sites fiables présents au *temps* 1Ba et 1Bb (cas 3, 13,1% des sites), et des sites fiables uniquement présents au *temps* 1Bb (cas 4, 11,5% des sites). Les quatre premiers cas représentent ainsi à eux seuls plus de 62% des sites.

Le niveau temporel 2 a également été introduit dans ces cas : le cas 5 par exemple, concerne les sites non fiables à la fois représentés au *temps* 1Ba, et à l'intervalle temporel moins précis recouvrant le *temps* 1A+1Ba. On ne peut donc savoir si, à l'échelle de l'Âge du Bronze, le *temps* 1Ba est le plus ancien temps de représentation de ces sites, ou si ceux-ci appartenaient déjà à un temps antérieur (1A) avant d'être représentés au *temps* 1Ba. Les derniers cas 18 à 22 sont un peu différents : ils concernent quant à eux les sites représentés au *temps* 1A+1Ba mais que l'on ne retrouve pas forcément avec « certitude » au *temps* 1Ba. Ils peuvent donc être situés à n'importe quel moment sur cet intervalle temporel.

Il est également intéressant de constater que certains sites changent de niveau de fiabilité au cours de leur trajectoire : au cas 15, certains sites d'habitat au *temps* 1Ba sont représentés au *temps* 1Bb mais leur fonction d'habitat n'est plus établie avec autant de certitude qu'au temps précédent. L'inverse se produit au cas 16, où des sites représentés au *temps* 1Ba et à la fonction d'habitat incertaine perdurent au *temps* 1Bb, où leur fonction d'habitat est désormais plus avérée.

Afin d'extraire de ce tableau les dynamiques spatio-temporelles de la zone étudiée à l'échelle du site, on se réfère à la Figure 76.

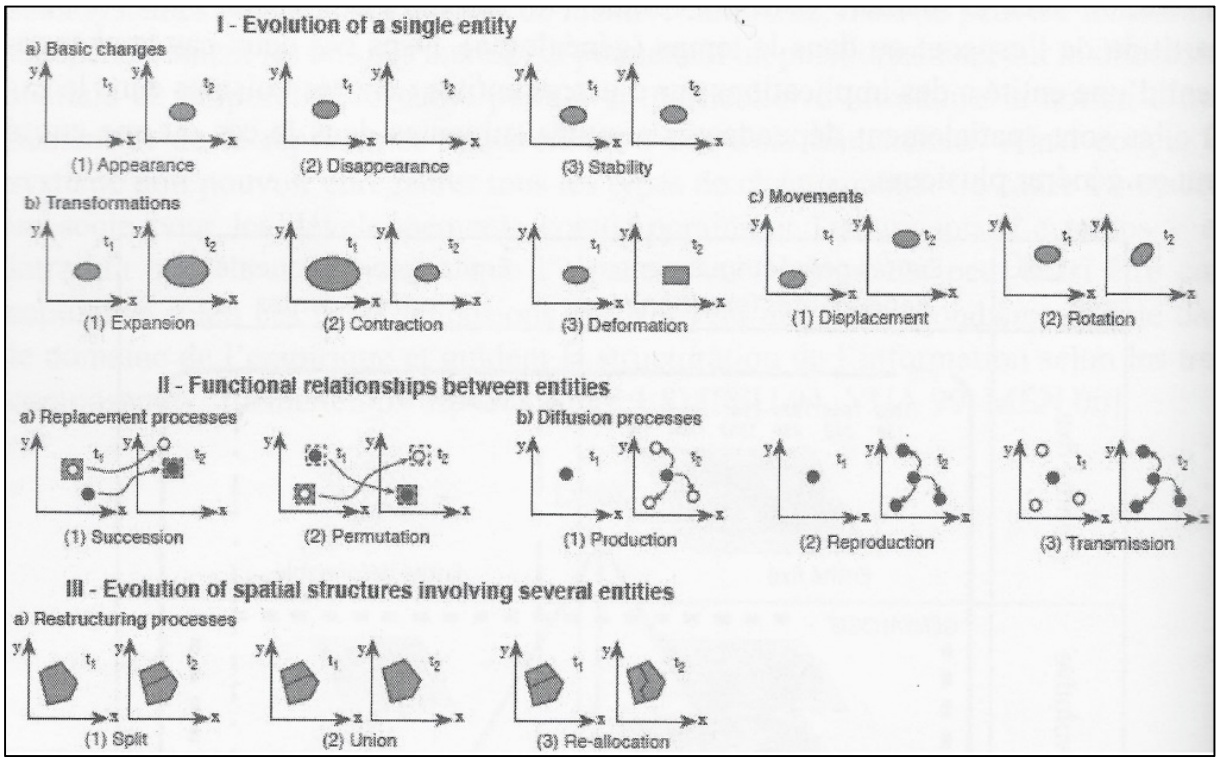


Figure 76 - Les types de processus spatio-temporels (Mathian, Sanders, 2014 ; d'après Claramunt, Thériault, 1995).

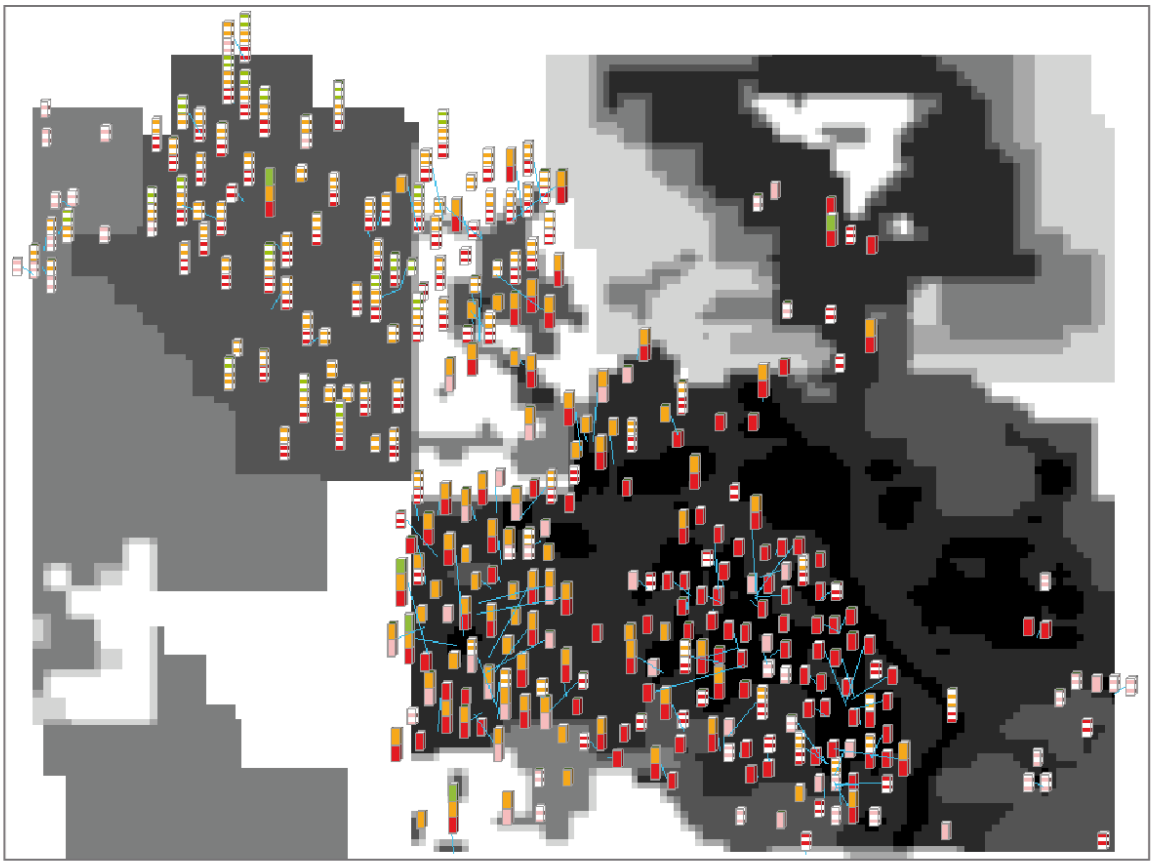
On considère ici les « changements basiques » sur l'évolution d'une entité en elle-même (I-a sur la figure).

- La disparition des sites d'un *temps* à l'autre (cas 1 : disparition du site entre 1Ba et 1Bb)
- L'apparition de nouveaux sites d'un *temps* à l'autre (cas 4 : apparition d'un site entre 1Ba et 1Bb)
- Le maintien de sites d'un *temps* à l'autre (cas 3 : maintien du site entre 1Ba et 1Bb)

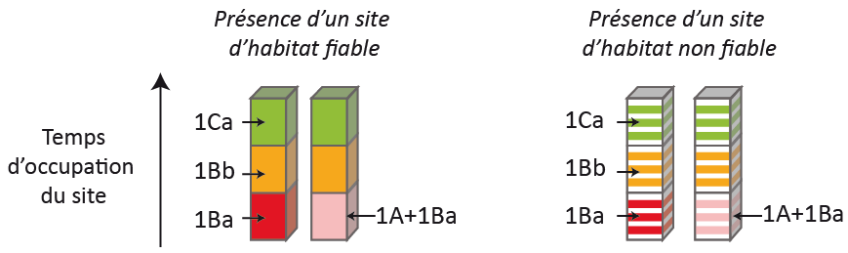
Ces dynamiques se déclinent différemment en fonction du *temps* considéré et du niveau de fiabilité des sites.

Il est en outre impossible d'observer à l'échelle du site des transformations de type expansion ou contraction (1-b sur la figure) : la taille du site relevée dans la base de données (lorsque cette information est disponible, ce qui n'est pas le cas pour tous les sites) indique en fait l'extension maximale du site. Il nous est donc impossible de comparer cette information avec la taille du site à une période antérieure ou postérieure. Les mouvements (I-c sur la figure) ne pourront également être identifiés à l'échelle du site: cela n'aurait aucun sens de tenter d'identifier le déplacement d'un site donné dans l'espace, à l'échelle temporelle à laquelle nous travaillons. Nous ne pourrons qu'observer soit deux sites que l'on pense contemporains, si ce déplacement s'est produit à la même époque, soit la disparition d'un site et l'apparition d'un nouveau site au *temps* suivant.

La question qui se pose est désormais de savoir si ces dynamiques sont localisées dans l'espace ou si elles se produisent de façon plus aléatoire. Pour répondre à cette interrogation, les informations du Tableau 22 ont été spatialisées (Figure 77).



Les trajectoires temporelles des sites archéologiques et l'incertitude qui y est associée



Niveaux d'intensité de la prospection archéologique

- Prospection systématique détaillée
- Prospection systématique densité forte
- Prospection générale
- Prospection densité faible
- Prospection par Google Earth
- Non prospecté

Figure 77 - Spatialisation des trajectoires temporelles des sites et de l'incertitude qui y est associée.

Les trajectoires de chacun des sites semblent bel et bien répondre à des logiques de localisation particulières, tant en ce qui concerne la fiabilité des données que les modes de changement. Ces configurations spatio-temporelles ont été schématisées sur la Figure 78.

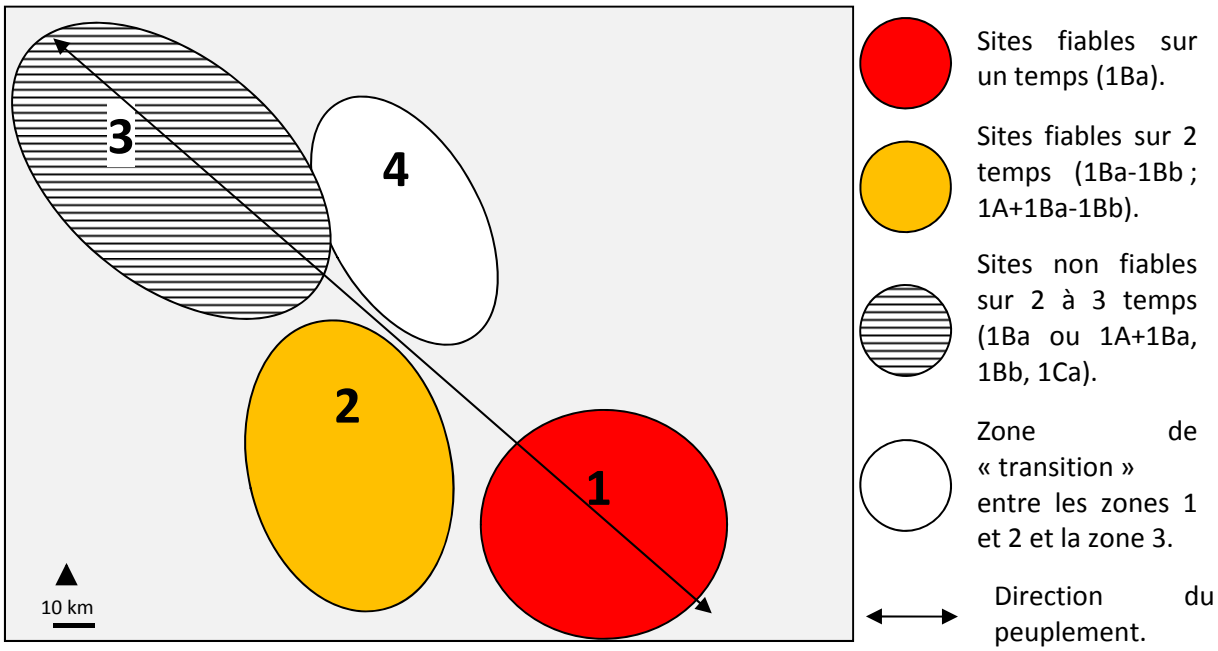


Figure 78 - Représentation schématique des principales configurations spatio-temporelles et d'incertitude relevées sur la figure précédente.

Si l'on considère que les sites sont répartis sur une diagonale Nord-Ouest Sud-Est, la zone 1 au Sud-Est, très bien prospectée, s'identifie par une forte densité de sites fiables uniquement représentés au *temps* 1Ba. En remontant vers le Nord-Ouest, une seconde zone apparaît, très bien prospectée également, et s'identifiant par une concentration de sites fiables datés des *temps* 1Ba ou 1A+1Ba et 1Bb. La zone 2 aurait donc été occupée plus longtemps que la zone 1, apparemment délaissée au *temps* 1Bb. La zone 3, la plus au Nord s'identifie quant à elle par une occupation moins dense que les deux premières zones (cette plus faible densité pouvant s'expliquer par des relevés moins minutieux dans cette zone moyennement prospectée), mais surtout par une occupation sur la totalité des *temps* étudiés, de 1Ba à 1Bb voire 1Ca, mais seulement par des sites dont la fonction d'habitat n'est pas avérée avec certitude. La zone 4 constitue quant à elle une zone que l'on pourrait appeler « de transition », plus mitigée, où sites fiables et non fiables se mélangent (avec tout de même un plus grand nombre de sites non fiables au Nord et de sites fiables au Sud), et où la durée d'occupation décroît à mesure que l'on descend vers le Sud.

Les structures spatio-temporelles et leurs dynamiques semblent ainsi bien dépasser l'échelle du site : de véritables zones apparaissent en fonction du temps considéré et de l'incertitude (fiabilité des données et zones d'intensité de la prospection). Cette information et les résultats du

variogramme, semblent nous indiquer qu'une compréhension de l'occupation du sol et de ses dynamiques peut être proposée à une échelle supérieure. Le changement d'échelle permettra en outre certainement d'identifier les transformations plus complexes indiquées sur la Figure 76 : s'il nous est par exemple impossible d'identifier des phénomènes de contraction/rétraction des sites, ces mécanismes pourront peut-être s'observer à l'échelle de « régions » homogènes, dont les principes de construction doivent encore être identifiés.

La première étape de cette élaboration consiste donc à passer de l'échelle du site à une observation des structures spatio-temporelles de la zone et de l'incertitude associée à l'échelle de la maille de 3 km de côté (choisie en fonction des résultats des variogrammes).

2.2.2 Observation des structures spatio-temporelles à l'échelle de la maille de 3x3 km

Les informations nécessaires à ce changement d'échelle sont tout d'abord présentées sur les Figure 79 et Figure 80, indiquant le nombre de sites par maille de 9 km² selon le temps considéré, et selon que l'on intègre les sites fiables uniquement, ou bien la totalité des sites.

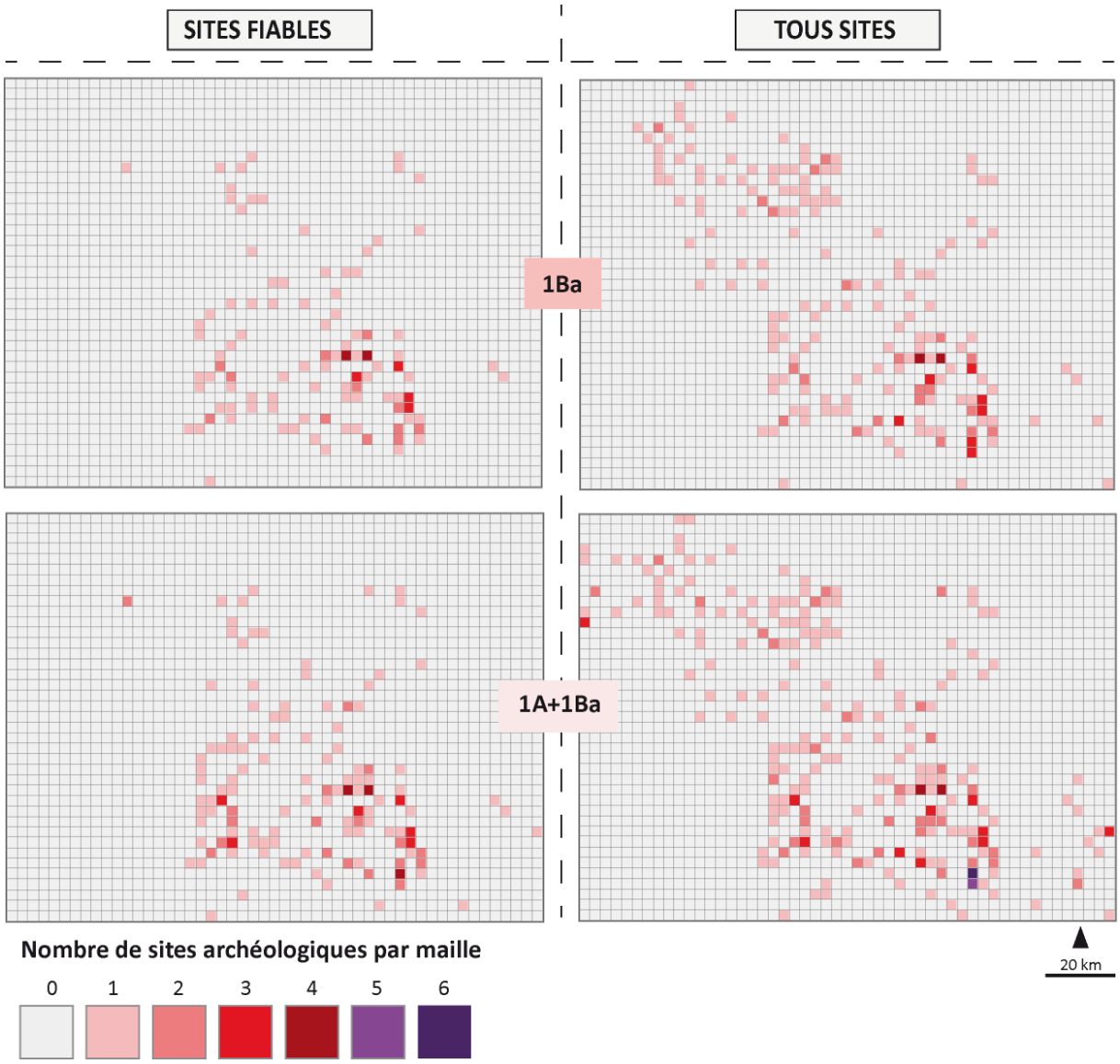


Figure 79 - Nombre de sites archéologiques par maille pour les *temps* 1Ba et 1A+1Ba.

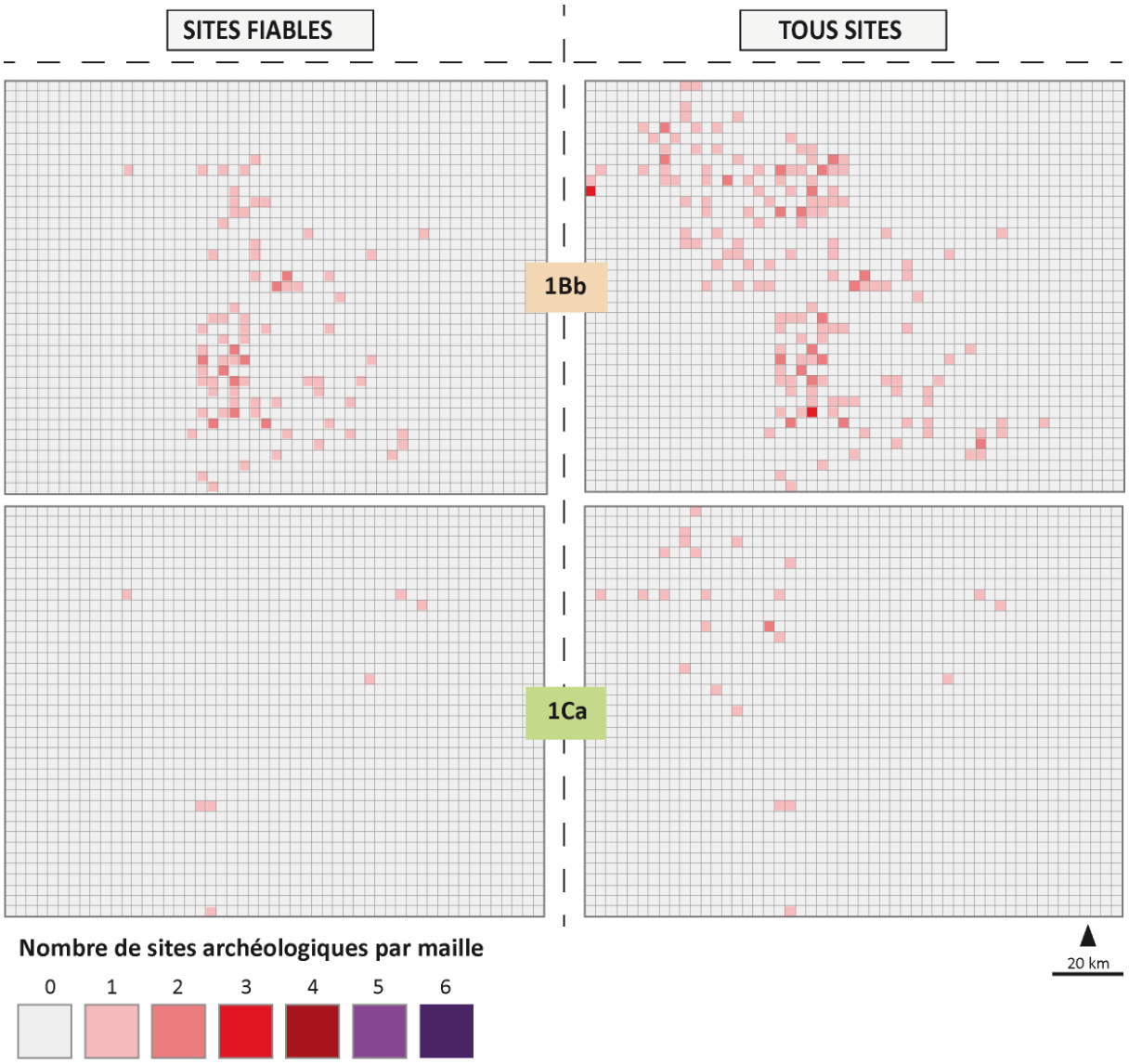


Figure 80 - Nombre de sites archéologiques par maille pour les *temps* 1Bb et 1Ca.

A partir de ces renseignements, les trois dynamiques observées plus tôt (apparition, disparition, maintien) ont été recherchées pour chaque maille. Les Figure 81 à Figure 85 et matérialisent le changement ou l'absence de changement entre les mailles, selon le niveau de fiabilité des sites et le niveau temporel considéré (changement entre 1Ba et 1Bb, et entre 1A+1Ba et 1Bb).

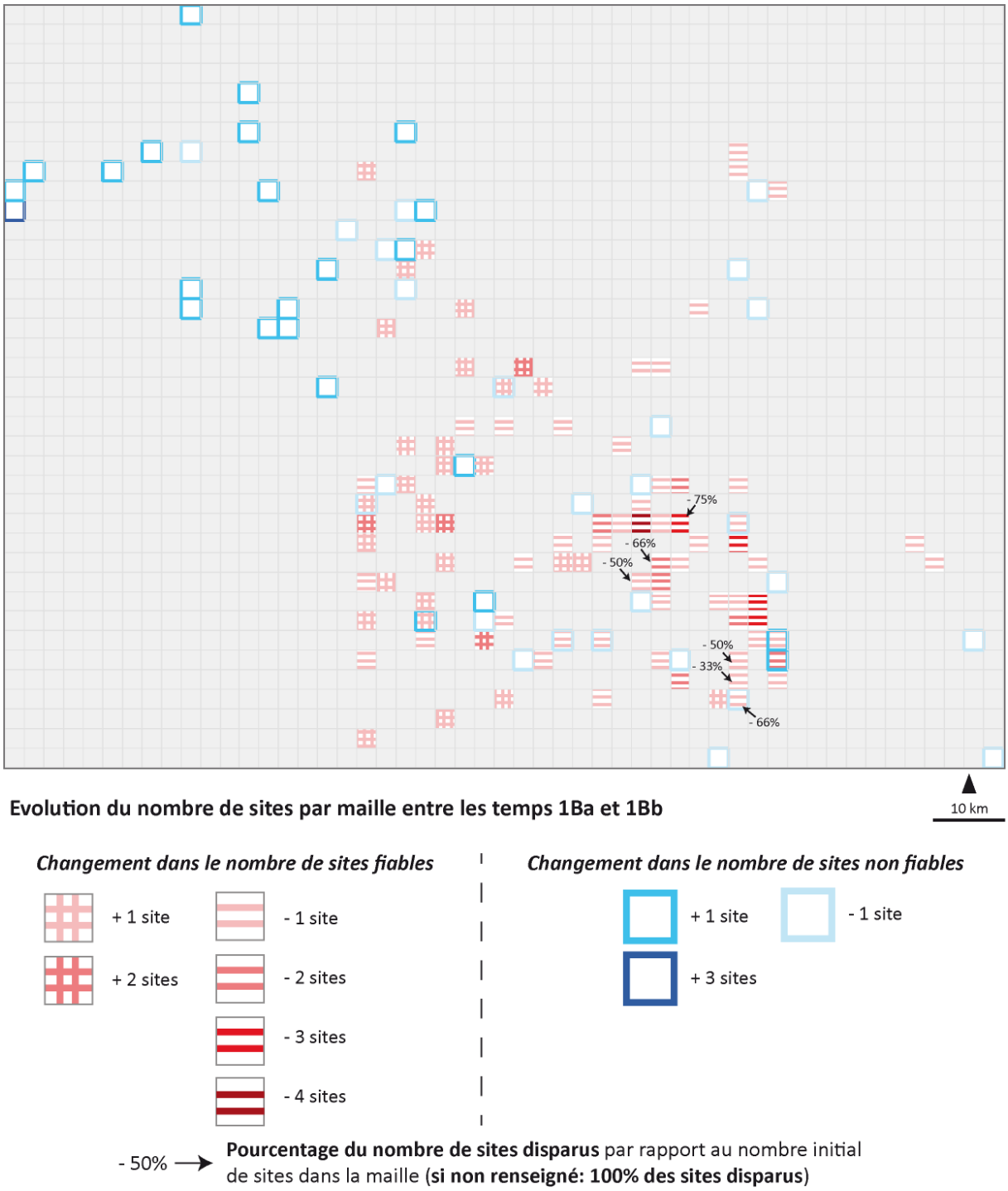


Figure 81 - Représentation des mailles dont le nombre de sites augmente ou diminue entre les *temps* 1Ba et 1Bb.

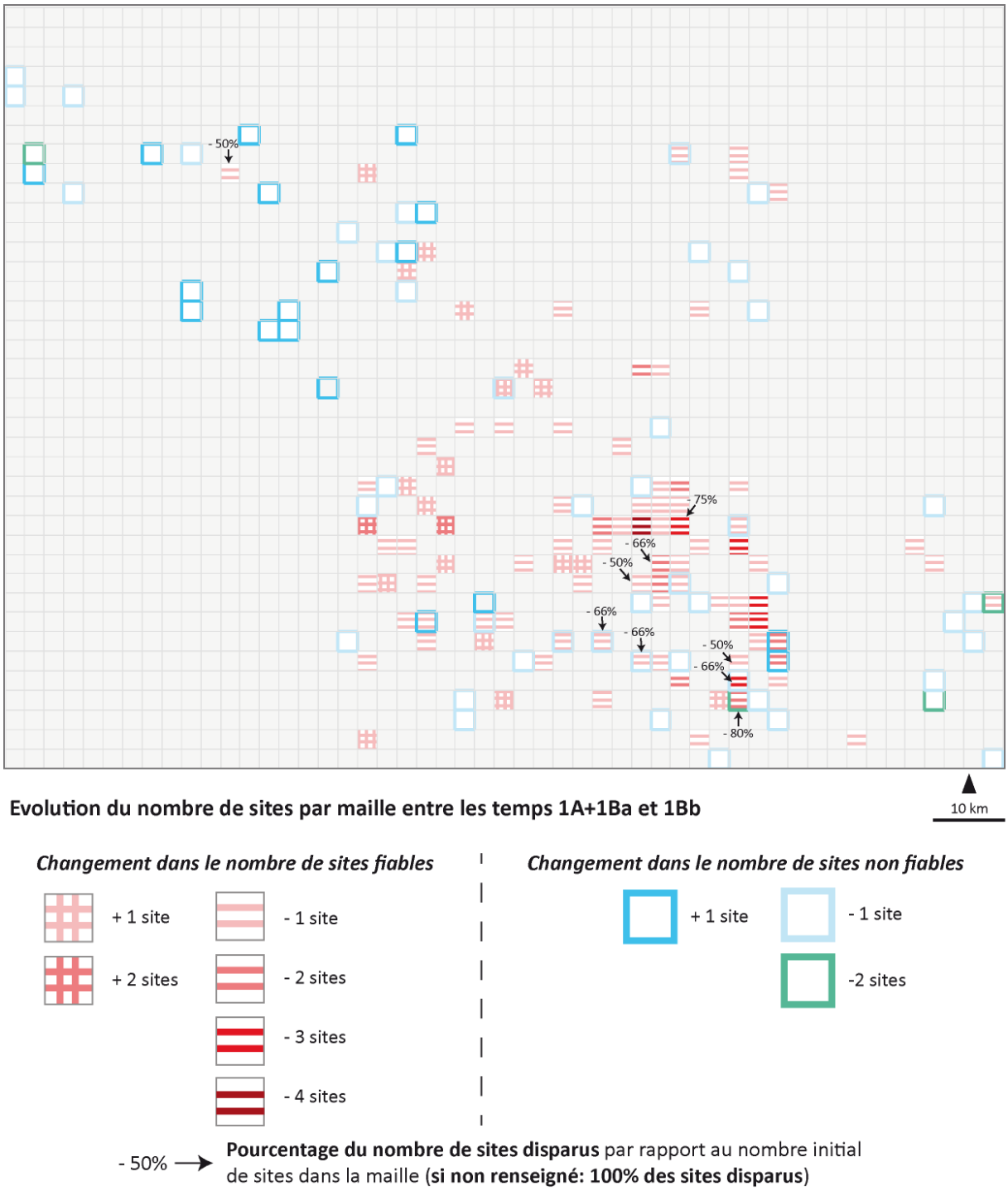


Figure 82 - Représentation des mailles dont le nombre de sites augmente ou diminue entre les *temps* 1A+1Ba et 1Bb.

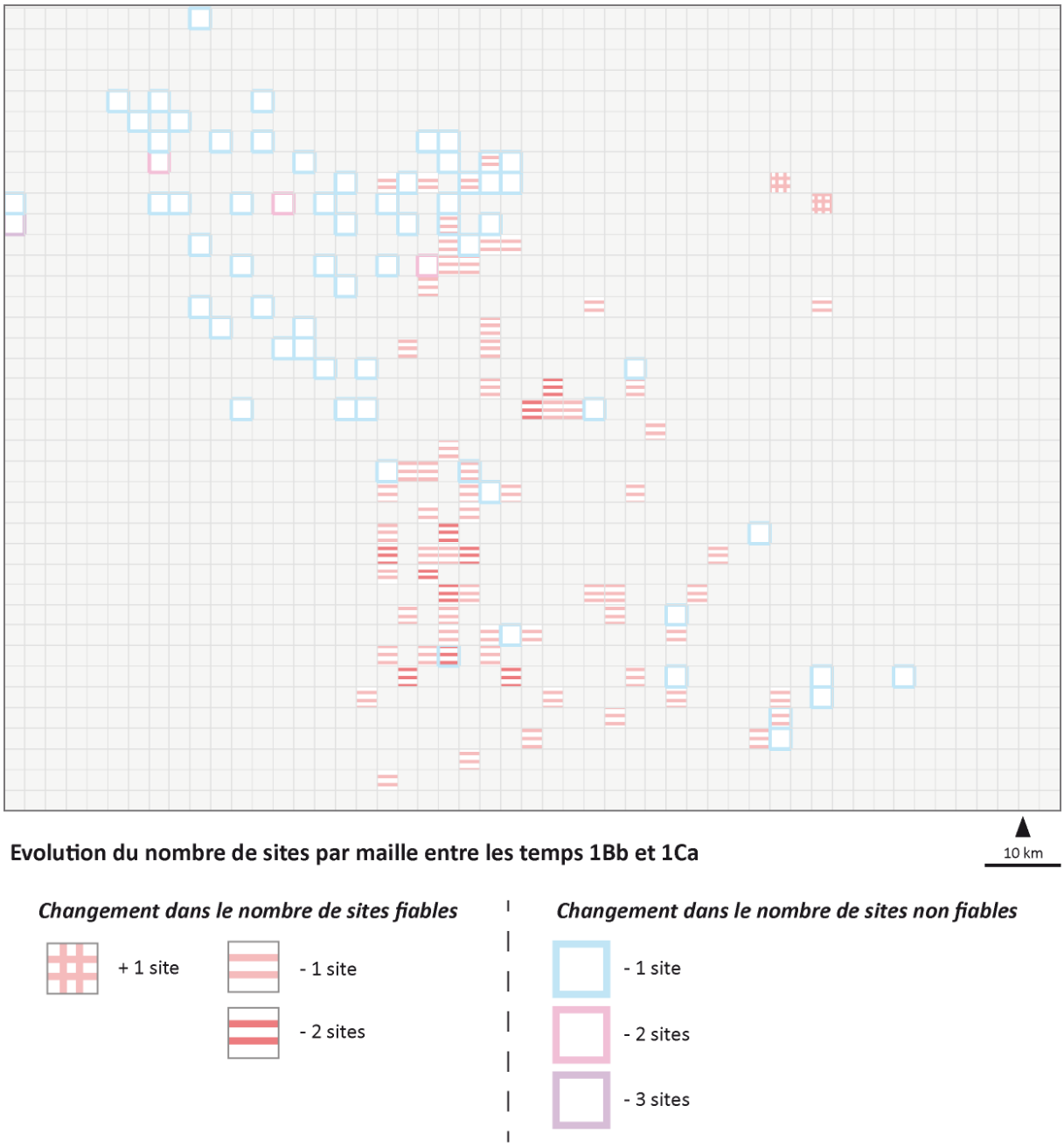


Figure 83 - Représentation des mailles dont le nombre de sites augmente ou diminue entre les *temps* 1Bb et 1Ca.

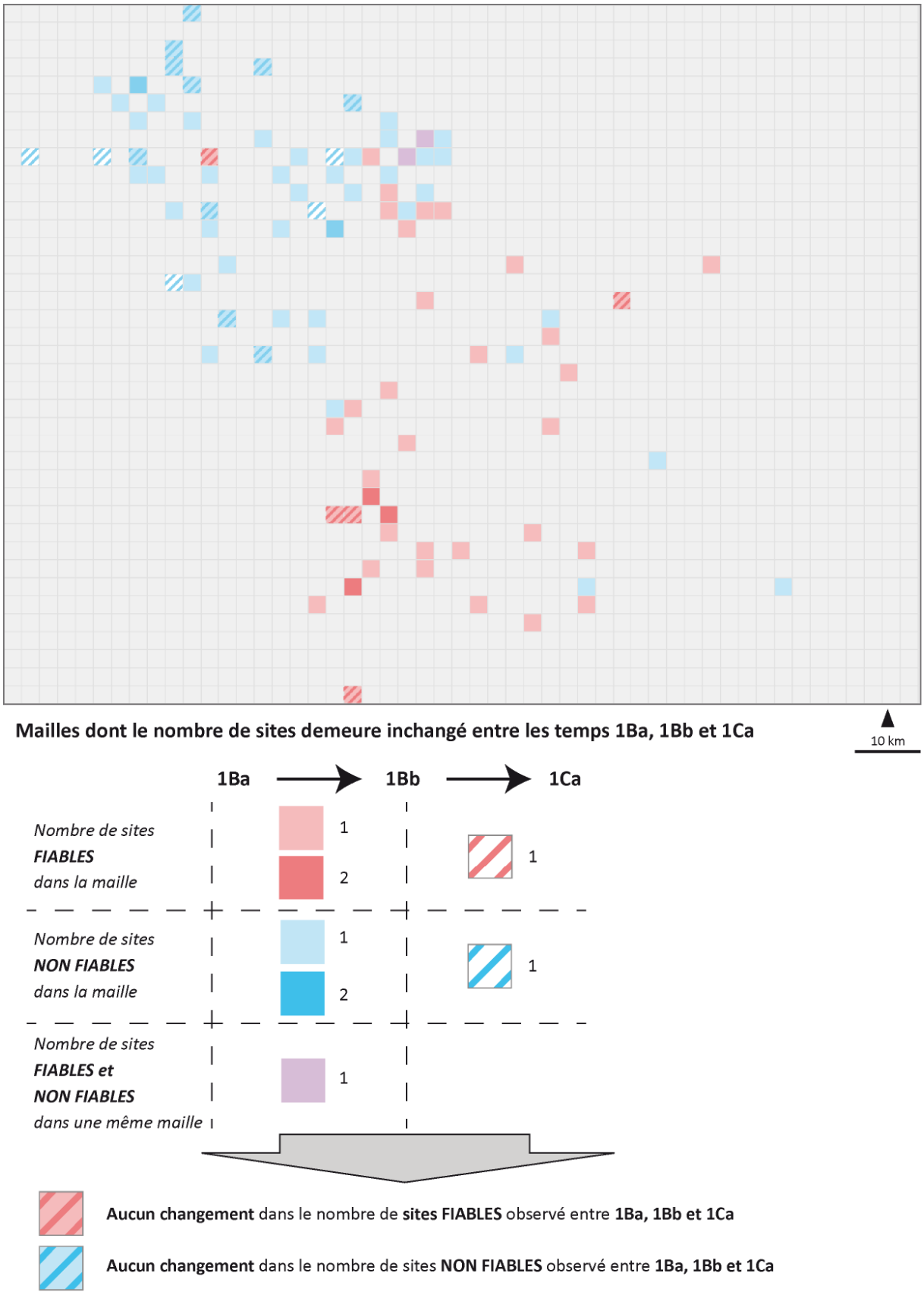


Figure 84 - Représentation des mailles dont le nombre de sites reste stable entre les *temps* 1Ba, 1Bb et 1Ca.

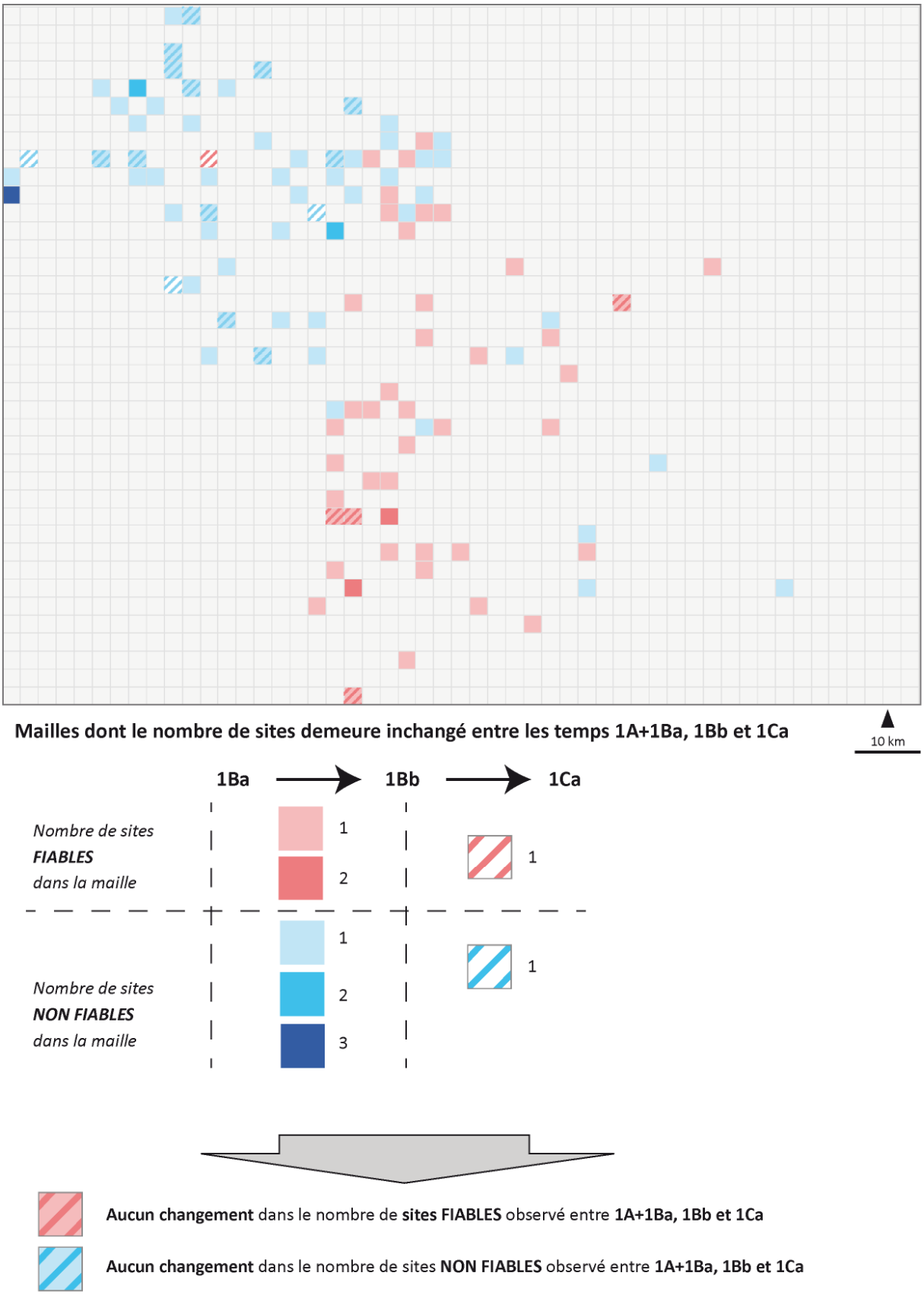


Figure 85 - Représentation des mailles dont le nombre de sites reste stable entre les *temps* 1A+1Ba, 1Bb et 1Ca.

Les phénomènes d'apparition, de disparition et de maintien varient considérablement dans leur localisation et leur intensité selon le temps, le niveau temporel et le niveau de fiabilité considérés. En outre, la prise en considération du niveau temporel 2 (1A+1Ba) peut parfois remettre en question certaines dynamiques supposées : il n'est en effet pas rare que certaines mailles où l'on pensait voir une apparition de sites du *temps* 1Ba au *temps* 1Bb soient en réalité des mailles stables du point de vue du *temps* 1A+1Ba, ou bien qu'une absence de dynamique (mailles vides aux deux temps considérés) au niveau temporel 1 masque la disparition de sites au niveau 2. La Figure 86, inspirée par la comparaison entre les résultats des dynamiques de changement observées entre 1Ba et 1Bb, et entre 1A+1Ba et 1Bb, synthétise les biais introduits par les niveaux d'observation et donc l'importance de prendre ceux-ci en considération.

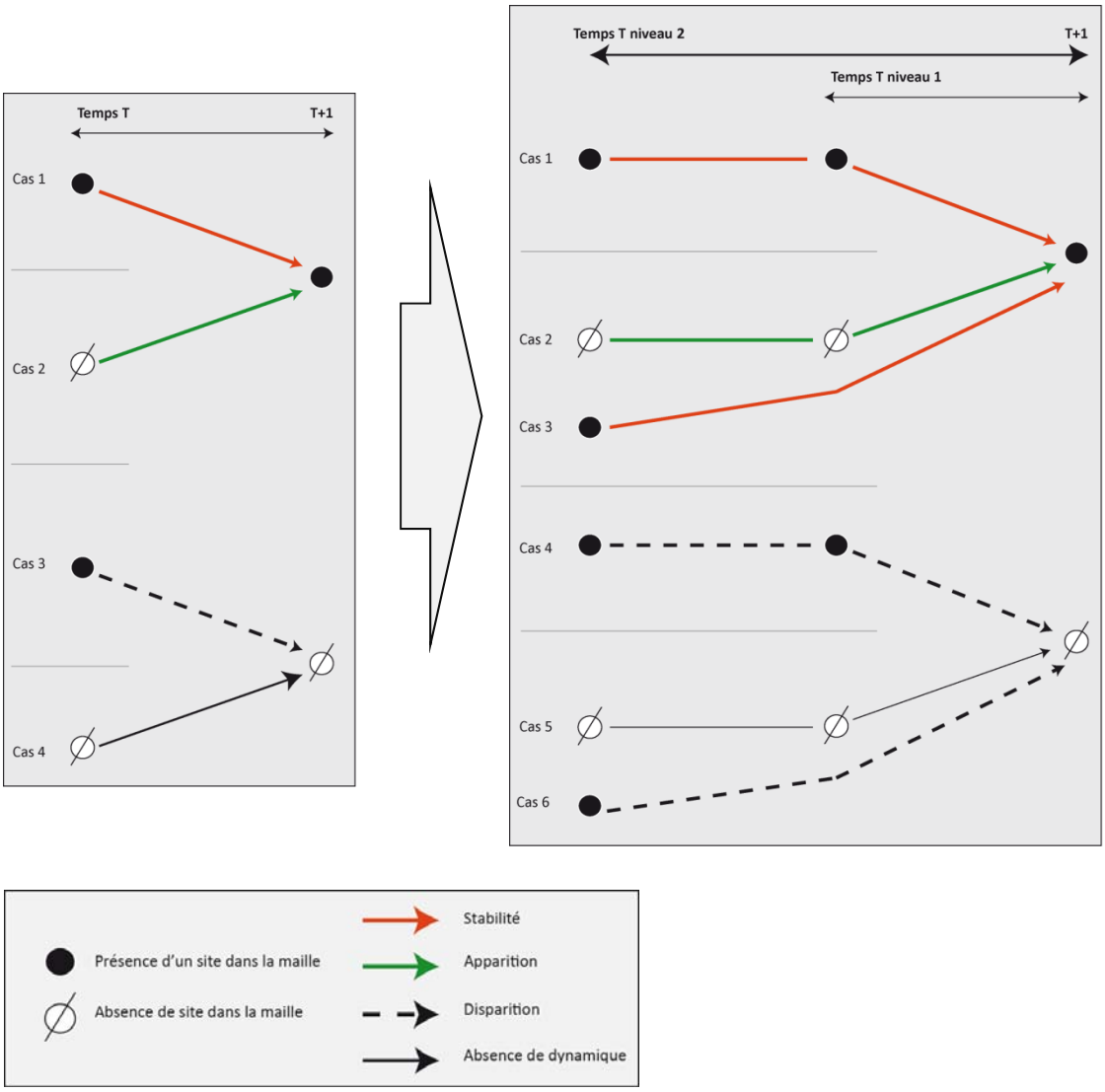


Figure 86 - Différences dans l'observation des dynamiques du peuplement, causées par l'introduction d'un niveau temporel supplémentaire.

Il semble à nouveau évident que des zones de changement ou d'absence de changement peuvent être révélées, mais une nouvelle information nous conduit à chercher un outil de régionalisation autre que celui simplement fourni par l'élaboration de ces cartes : au sein des zones d'apparition, de disparition ou de maintien des sites, le changement ne s'opère spatialement pas de manière régulière et homogène mais sous forme de concentration/dispersion (la localisation des sites n'étant elle-même au départ pas régulière et homogène sur l'ensemble de la zone étudiée). Nous avons ainsi besoin d'une méthode rigoureuse, exploratoire, reproductible et permettant la comparaison entre divers temps et espaces à partir de laquelle une régionalisation du changement pourra être effectuée en se basant à la fois sur son intensité et sur sa concentration ou sa dispersion dans l'espace. Le calcul des Local Indicators of Spatial Association (LISA) répond selon nous à ces différents critères et a donc été choisi afin de révéler les structures spatio-temporelles du changement.

2.3 Identifier les structures spatio-temporelles de l'occupation du sol et de son changement homogènes par le calcul des LISA (Local Indicators of Spatial Association).

2.3.1 Le choix de l'indice local de Moran

Cette méthode de calcul de l'autocorrélation spatiale repose sur la loi de proximité de Tobler, également appelée « première loi de la géographie », selon laquelle « Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things » (Tobler, 1970). Autrement dit, cette loi postule que « toutes choses égales par ailleurs, les points voisins sont plus susceptibles d'avoir des valeurs proches que les points éloignés » (Zaninetti, 2005).

Les indicateurs statistiques d'autocorrélation spatiale permettent ainsi de calculer cette corrélation et son intensité entre les unités spatiales voisines, et fournissent une mesure globale pour un espace d'étude (Liziard, 2013). Ainsi, le résultat est positif si les valeurs proches ont plus tendance à se ressembler que les valeurs éloignées, et est négatif si les valeurs proches ont tendance à être plus dissemblables que les valeurs éloignées. Un résultat nul indique l'absence d'autocorrélation spatiale. Ces indicateurs offrant cependant une mesure globale à l'espace étudié, ceux-ci ne permettent toutefois pas de mettre en évidence les configurations spatiales associées aux phénomènes d'autocorrélation, c'est-à-dire, le type de structure spatiale à laquelle les unités spatiales voisines appartiennent et qu'elles décrivent (Casanova, 2010). Or, ce sont bien ces phénomènes que nous souhaitons mettre en évidence : l'objectif n'est pas ici d'évaluer la dépendance spatiale locale, mais bien de repérer les structures qui y sont associées (Liziard, 2013).

C'est pour combler cette lacune que ces indices ont été décomposés en leurs composantes locales : les Local Indicators of Spatial Association (Anselin, 1995). Ceux-ci « permettent de repérer des agrégats de valeurs associées localement (clusters) des singularités locales (*outliers*) et des configurations spatiales locales (local patterns) que la non-stationnarité spatiale peut camoufler dans une analyse globale » (Zaninetti, 2005).

Si les indices globaux de Geary et de Moran ont tous deux été déclinés dans leur composante locale, nous avons ici choisi de nous tourner vers l'indice local de Moran, conçu par Luc Anselin (1995). En effet, celui-ci présente l'avantage d'identifier des points chauds et des points froids, c'est-à-dire qu'il distingue les zones homogènes selon que leurs valeurs sont élevées ou basses, ce qui n'est pas le cas de l'indice de Geary (Liziard, 2013). En outre, selon Jean-Marc Zaninetti (2005) « l'interprétation de l'indice local de Geary est délicate, et la plupart des auteurs recommandent de lui préférer l'indice local de Moran dont les propriétés sont mieux connues, et plus conformes à la vocation statistique de scan spatial de l'indice ». En outre, selon le même auteur, les indices locaux de Getis et Ord « servent plus précisément à identifier lacunes et agrégats dans un jeu de données » tandis que l'indice local de Moran (tout comme l'indice local de Geary) permet d'identifier des sous-ensembles homogènes ou les territoires atypiques, ce qui correspond mieux à notre objectif de régionalisation. Enfin, le calcul de l'indicateur local de Moran est implémenté au sein du logiciel GeoDa, freeware élaboré par Luc Anselin (2004, 2005, 2009).

A partir de l'indice de Moran noté I, Luc Anselin (1995) propose la formule du I local de Moran ou LISA noté Ii (Zaninetti, 2005). Le LISA L_i d'une variable Y, observée en un lieu *i* se définit tel que (Anselin, 1995):

$$L_i = f\ (Y_i, YJ_i)$$

Où f est une fonction et YJ_i les valeurs observées dans le voisinage J_i de *i*.

Sous sa forme globale, l'indice de Moran se présente de la façon suivante :

$$I = \frac{N \sum_{i \neq j} W_{ij}\ (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{M \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

Le numérateur s'interprète comme la covariance pondérée entre les unités spatiales voisines ; le dénominateur correspond à la variance totale observée.

La matrice de contigüité W_{ij} traduit la force du lien spatial existant entre deux observations localisées i et j. X est le caractère quantitatif étudié, x_i est sa réalisation en *i*, x_j sa réalisation en *j* et la moyenne se note $\bar{x}$. N est le nombre total d'individus dans l'échantillon, et M le nombre total de paires de voisins.

Le LISA se présente quant à lui de la façon suivante :

$$I_i = \frac{N \sum_j W_{ij} \, (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{M \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \; Avec \; \frac{N}{M} = 1$$

Quelques applications des LISA en archéologie ont été effectuées, mais à une échelle intrasite. Par exemple, Kevin R. Schwarz et Jerry Mount (2006) ont appliqué cette mesure à l'étude de la distribution des artefacts près d'un temple Maya au Guatemala.

Le but recherché n'est pas ici de tester localement la dépendance spatiale mais de révéler les structures qui y sont associées. Notre démarche s'inspire ainsi de l'étude de Sébastien Oliveau (2005) qui mobilise le calcul des LISA comme méthode de régionalisation permettant de rendre compte des inégalités spatiales du développement au Tamil Nadu. Nous nous basons également sur le travail de Sophie Liziard (2013), qui calcule les LISA sur les taux de croissance démographique annuels moyens des 39 aires d'étude constituant l' « Arc Latin », et envisage les regroupements de type « *high-high* » (c'est-à-dire les groupes continus de communes ayant une forte dynamique démographique), comme des marqueurs du processus de littoralisation. Ainsi, « analyser l'évolution des regroupements *high-high* est susceptible de mettre en évidence les phénomènes de concentration/diffusion de la population et les processus d'homogénéisation/différenciation des dynamiques de peuplement » (Liziard, 2013).

Le calcul des LISA a donc pour objectif de révéler les structures spatiales du changement en révélant les zones où il s'effectue sous forme de *clusters high-high* (regroupements d'unités spatiales caractérisées par des valeurs élevées, c'est-à-dire des concentrations de mailles à fort taux de changement ou de stabilité) ou d'*outliers high-low* (unités spatiales ayant une valeur élevée par rapport à celle de leur voisinage, c'est-à-dire des mailles à fort taux de changement ou de stabilité plus isolées, dispersées sur la zone d'étude).

2.3.2 Paramétrage du calcul des LISA

Divers types de LISA ont été calculés (Figure 88) :

- Des LISA univariés (calculant la dépendance entre chaque unité spatiale et son voisinage) ont été calculés sur les grilles indiquant le nombre de sites pour chaque maille de 3 km de côté, pour chaque temps et selon que l'on y intègre les sites fiables uniquement ou la totalité des sites (Figure 79 et Figure 80). Ceux-ci permettent d'obtenir une image des structures spatiales pour chaque temps. En outre, il s'agit d'une image statique dans la mesure où la dynamique et l'évaluation du changement ne peuvent être introduites qu'en comparant les résultats de chaque temps les uns après les autres.
- Afin de dépasser cette optique comparative, trois maillages ont été élaborés pour chaque *temps* étudié à partir des cartes de changement présentées précédemment : le premier figure les mailles dont la valeur augmente entre 1Ba et 1Bb (ou entre 1A+1Ba et 1Bb), le second les mailles dont la valeur diminue, et le dernier les mailles dont la valeur ne change pas. La valeur de chaque maille correspond à l'intensité du changement (ou de l'absence de changement), c'est-à-dire le nombre de sites en moins, en plus, ou restant stables. Le calcul des LISA a donc ici pour objectif de mettre en évidence les structures spatiales du changement en travaillant directement sur l'image de ce changement, sans passer à nouveau par l'intermédiaire de la comparaison entre deux états t et t+1 ou t-1.
- Des LISA bivariés (calculant la dépendance entre une unité spatiale au temps t et cette même unité au temps t+1) ont été calculés à partir des mêmes grilles ayant permis d'élaborer les LISA univariés pour les *temps* 1Ba, 1Bb et 1A+1Ba. Les LISA bivariés ont ainsi permis de calculer la dépendance entre la valeur de chaque maille au *temps* 1Ba (et 1A+1Ba) et ces mêmes valeurs au *temps* 1Bb. Cette démarche est ainsi complémentaire du calcul des LISA univariés, car elle confère un autre point de vue sur la teneur du changement et de l'absence de changement et sur les structures spatiales qui y sont associées.

Les LISA ont tous été calculés à partir du freeware d'analyse de données spatiales GeoDa 1.6.7 conçu par Luc Anselin (2004, 2005, 2009). Le calcul des LISA implique un certain nombre de paramètres :

- Les relations de voisinage entre unités spatiales sont spécifiées dans des matrices de pondération spatiale W qui renseignent sur la présence ou l'absence de voisins pour toutes les unités spatiales prises deux à deux. Le critère de voisinage choisi (afin de déterminer si deux mailles de la grille sont voisines ou non) est le « cas de la reine » (Figure 87), où chaque maille partageant un côté ou un sommet avec une autre est considérée comme voisine.

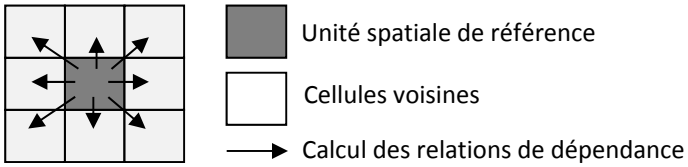


Figure 87 - Relations de voisinage définies par le "cas de la reine"

- Seuls les *temps* 1Ba, 1A+1Ba et 1Bb ont pu être intégrés dans l'analyse, le *temps* 1Ca comportant bien trop peu de sites pour tenter toute analyse statistique.
- Lors de la cartographie des résultats, seules les valeurs des I locaux de Moran significativement différentes de zéro (absence d'autocorrélation spatiale) sont représentées (le seuil a été fixé à 5%).

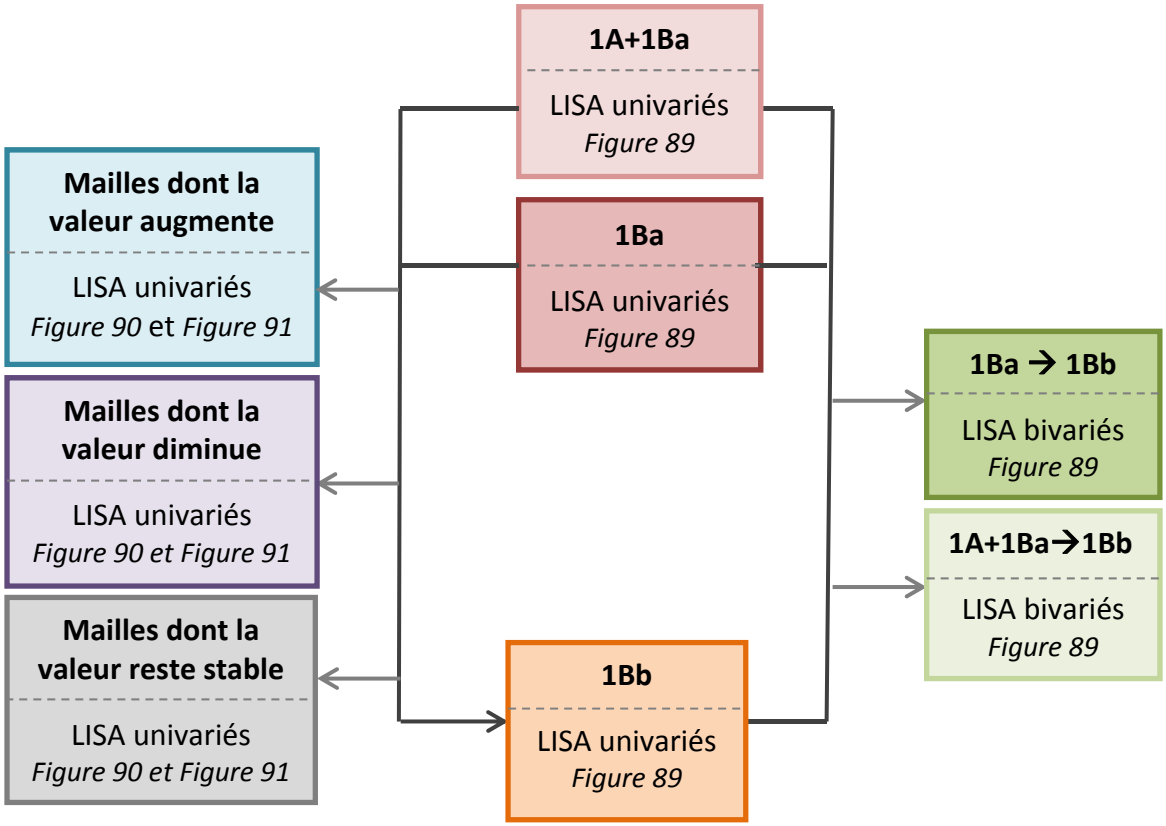


Figure 88 - Les divers types de LISA calculés

2.3.3 Mise en évidence des structures spatio-temporelles du changement par les LISA

Les LISA mettent en évidence diverses structures locales d'associations spatiales remarquables (Oliveau, 2010) :

- Les mailles ayant une valeur forte (fort nombre de sites) dans un voisinage qui leur ressemble (autocorrélation spatiale positive et valeur de l'indice élevé) : situation décrite en « plus-plus » (clusters *high-high*) ;
- Les mailles ayant une valeur faible (faible nombre de sites) dans un voisinage qui leur ressemble (autocorrélation spatiale positive et valeur de l'indice faible) : situation décrite en « moins-moins » (clusters *low-low*) ;
- Les mailles ayant une valeur forte dans un voisinage qui ne lui ressemble pas (autocorrélation spatiale négative et valeur de l'indice élevé) : situation décrite en « plus-moins » (*high-low*) ;
- Les mailles ayant une valeur faible dans un voisinage qui ne lui ressemble pas (autocorrélation spatiale négative et valeur de l'indice faible) : situation décrite en « moins-plus » (*low-high*) ;
- Les mailles aux valeurs non significatives (les LISA rapportant les écarts locaux à la moyenne générale de l'aire d'étude, il s'agit concrètement des mailles dont les valeurs et les valeurs du voisinage sont proches de la moyenne de l'échantillon total).

Les regroupements d'unités « *high-high* » ou «*low-low* » sont respectivement nommés « *hot-spots* » ou « *cold-spots* ». Les unités « *high-low* » ou « *low-high* » sont quant à elles nommées « *spatial outliers* » (c'est-à-dire, des valeurs spatialement atypiques). Les Figure 89, Figure 90 et Figure 91 représentent les résultats des divers LISA calculés et annoncés en Figure 88.

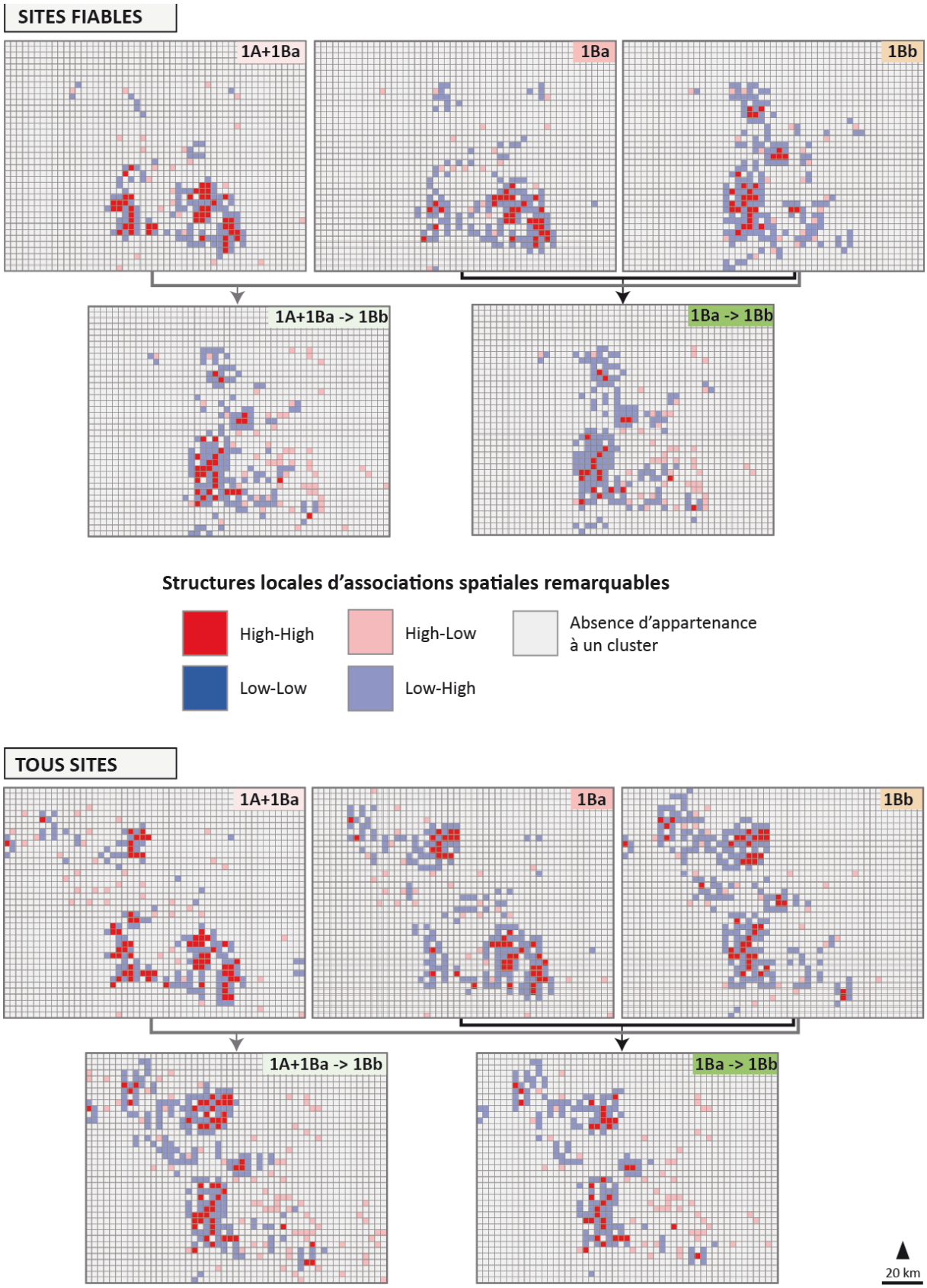


Figure 89 - Résultats des LISA univariés (réalisés sur le nombre de sites par maille pour chaque temps) et bivariés (réalisés entre les *temps* 1A+1Ba et 1Bb, et entre 1Ba et 1Bb).

Figure 90 - Résultats des LISA réalisés à partir des mailles dont la valeur augmente, diminue et reste stable, pour les sites fiables

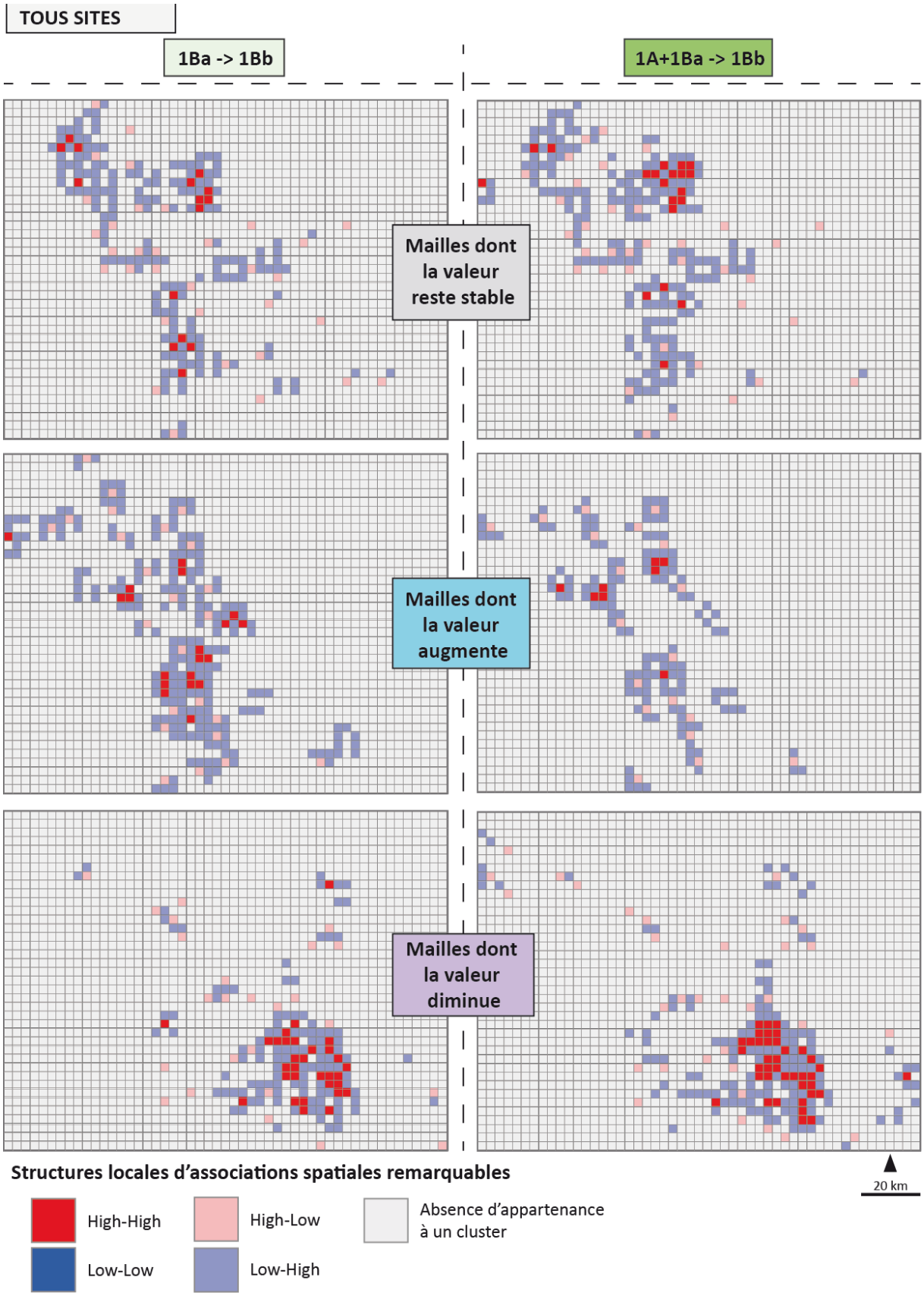


Figure 91 - Résultats des LISA réalisés à partir des mailles dont la valeur augmente, diminue et reste stable, pour la totalité des sites

Comme on peut le voir sur les Figure 89, Figure 90 et Figure 91, les LISA permettent de mettre en évidence l'hétérogénéité spatiale sous forme d'une organisation plus ou moins concentrée ou dispersée (Figure 92).

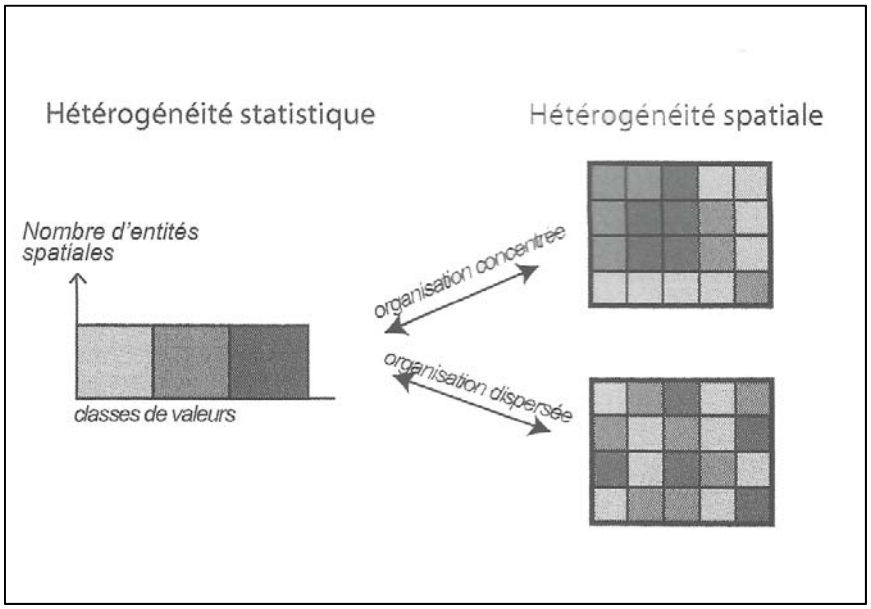


Figure 92 - Hétérogénéité statistique et hétérogénéité spatiale (Mathian, Sanders 2014)

Nous faisons l'hypothèse que les regroupements de type « *high-high* » et « *high-low* » constituent des marqueurs significatifs des structures spatiales du changement sur la zone étudiée, et que ceux-ci témoignent de deux modes d'occupation du sol et de changement sous forme de concentration/dispersion.

Une analyse de la répartition spatio-temporelle des regroupements « *high-high* » et « *high-low* » serait donc susceptible de mettre en évidence les phénomènes de concentration/dispersion du peuplement et de ses dynamiques sur la zone étudiée.

A partir des résultats des LISA produits, les clusters « *high-high* » et des *outliers* « *high-low* » significatifs ont été sélectionnés et extraits afin d'être étudiés pour eux-mêmes (Figure 93).

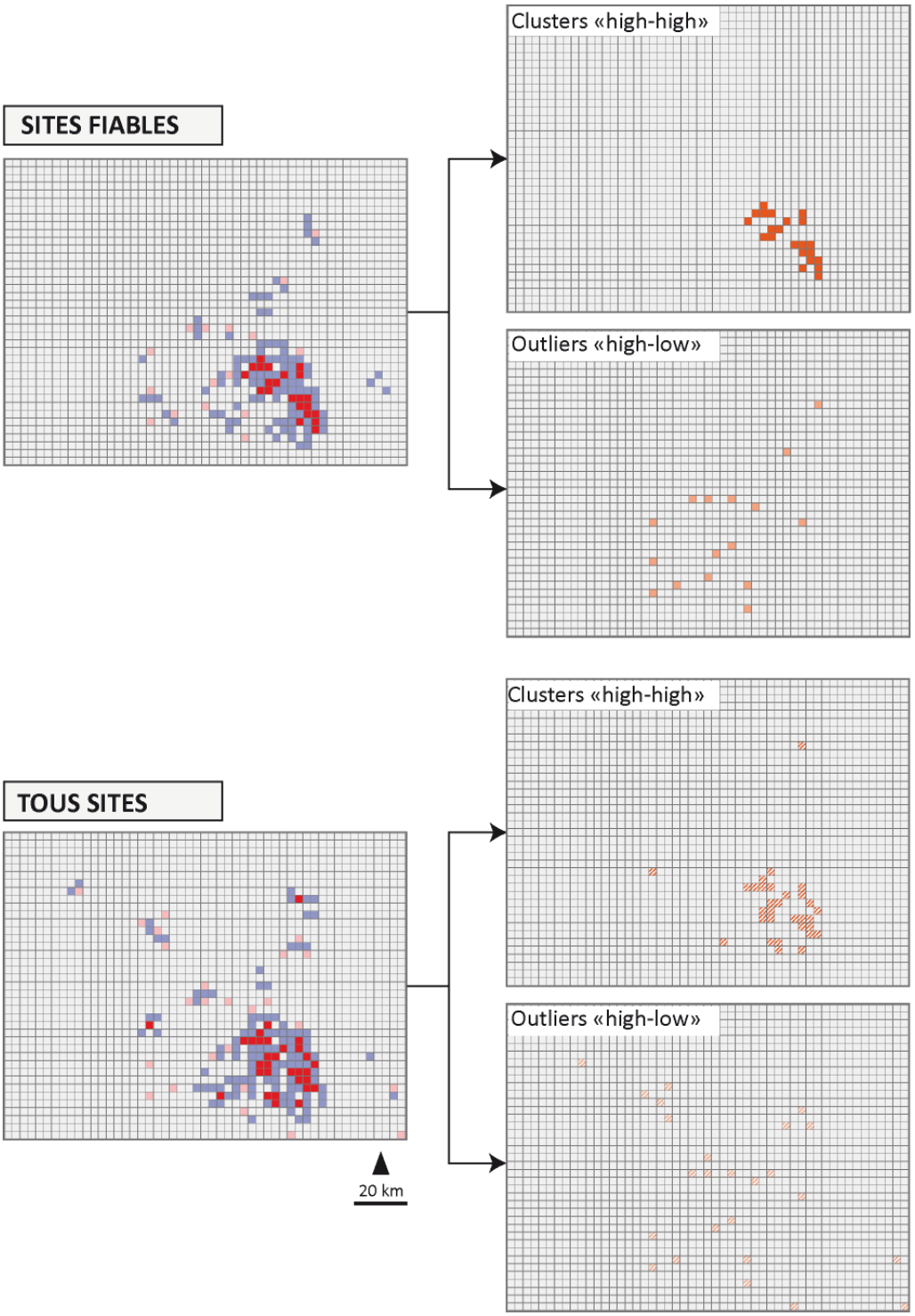


Figure 93 - Extraction des mailles "*high-high*" et "*high-low*" des résultats des LISA

Dans le but d'évaluer la répartition des deux modes d'occupation du sol « high-high » et « high-low », c'est-à-dire « concentrée » ou « dispersée », nous avons calculé le pourcentage du nombre de mailles qu'ils représentent par temps et niveau de fiabilité. La Figure 94 représente cette proportion pour les LISA calculés sur les LISA univariés « statiques », c'est-à-dire le peuplement aux *temps* 1Ba, 1A+1Ba et 1Bb, tandis que la Figure 95 montre cette proportion pour les LISA

calculés sur le changement ou l'absence de changement entre les *temps* 1Ba et 1Bb (mailles dont la valeur augmente, diminue ou reste stable) et entre les *temps* 1A+1Ba et 1Bb.

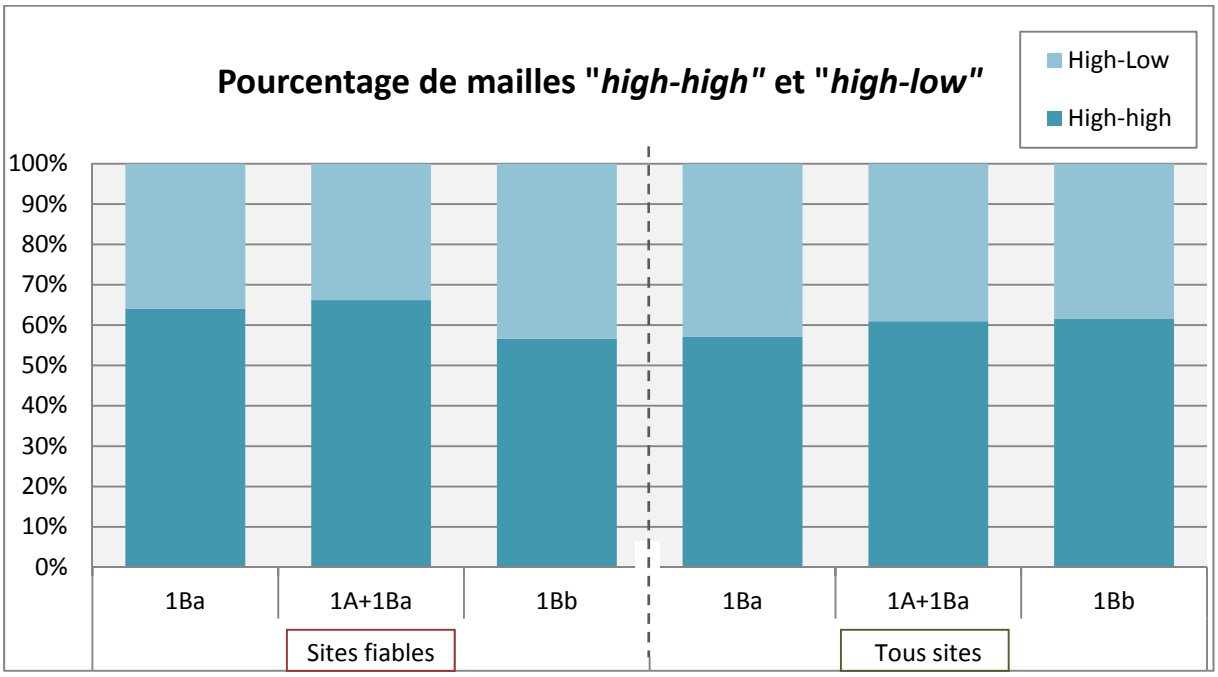


Figure 94 - Pourcentage du nombre de mailles représentées par le cluster "high-high" et *l'outlier* "*high-low*" pour les LISA calculés sur le nombre de sites par mailles pour chaque temps et chaque niveau de fiabilité.

Ce graphique nous indique que la majorité de l'occupation du sol s'effectue en mode « high-high » pour tous les *temps* étudiés et quel que soit le niveau de fiabilité considéré. Il ne s'agit cependant pas d'une majorité « écrasante » puisqu'elle oscille entre 57% (minimum atteint au *temps* 1Bb pour les sites fiables) et 66% (maximum atteint au *temps* 1A+1Ba pour les sites fiables). Il faut à ce propos noter la persistance dans le temps et quel que soit le niveau temporel considéré de ce relatif équilibre entre les deux modes d'occupation.

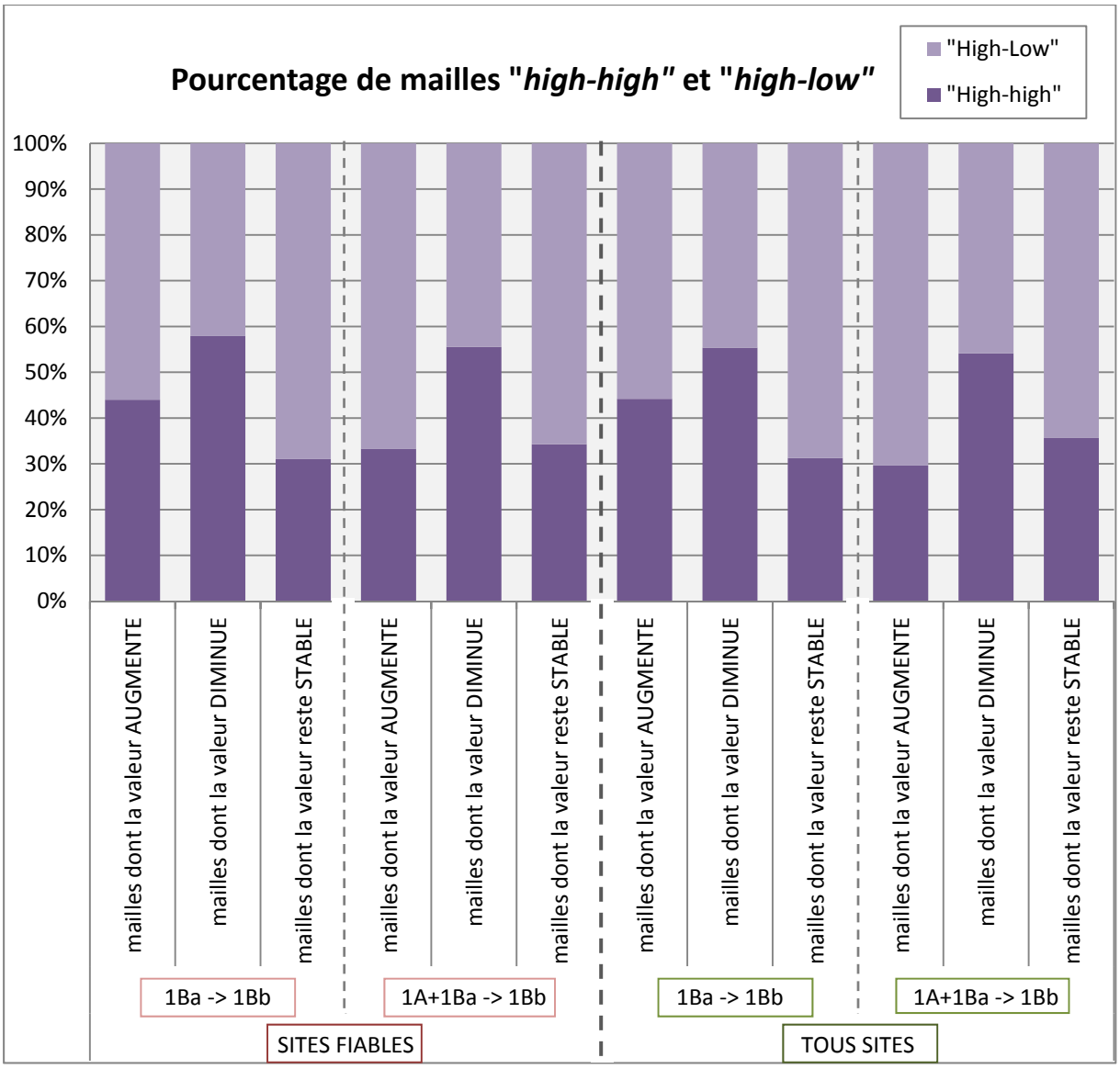


Figure 95 - Pourcentage du nombre de mailles représentées par le cluster "*high-high*" et *l'outlier* "*high-low*" pour les LISA calculés sur le changement entre les *temps* 1Ba et 1Bb et 1A+1Ba et 1Bb, et par niveau de fiabilité.

Les structures du changement semblent, quant à elles, bien plus hétéroclites. On note que les mailles dont la valeur augmente entre 1Ba (ou 1A+1Ba) et 1Bb se présentent plus sous forme d'*outlier*, c'est-à-dire dispersée, que de *cluster* (de 70% à 56%). C'est également le cas pour les mailles dont la valeur reste stable (69% à 65%). L'inverse se produit si l'on ne considère que les mailles dont la valeur diminue : la baisse s'effectue principalement sous forme de cluster (entre 54% et 58% des mailles).

On peut constater que la distinction entre les sites fiables et la totalité des sites n'introduit pas de différence considérable dans la proportion entre les deux modes (cluster et *outlier*). Etant donnée la forte concentration de sites non fiables observée précédemment au Nord-Ouest de la zone

d'étude, nous savons toutefois d'ores et déjà que si la prise en compte de ce niveau d'incertitude n'introduit pas de différenciation statistique entre les deux modes de changement dans l'occupation du sol, il introduit une forte différenciation spatiale. Le niveau temporel 2 (1A+1Ba) introduit quant à lui une différenciation pour les mailles dont la valeur augmente, en renforçant le nombre *d'outliers*.

On peut également constater que les zones subissant les plus forts taux de diminution de sites entre les *temps* 1Ba et 1Bb (ou 1A+1Ba et 1Bb) sont des zones de forte concentrations du peuplement, contrairement aux zones stables ou d'apparition de sites, ces deux dynamiques s'opérant principalement de manière plus dispersée.

Afin d'observer spatialement de manière plus synthétique et visuelle les diverses informations produites précédemment (type d'occupation du sol et de changement, différenciations introduites par le niveau temporel et de fiabilité des données considéré) celles-ci ont été reprises graphiquement à l'aide d'un logiciel de traitement d'image (Adobe Illustrator CS5). Afin de ne pas surcharger la visualisation des phénomènes, les niveaux d'intensité de la prospection ont été ramenés à un niveau seulement, zones « peu ou pas prospectées » (Figure 96).

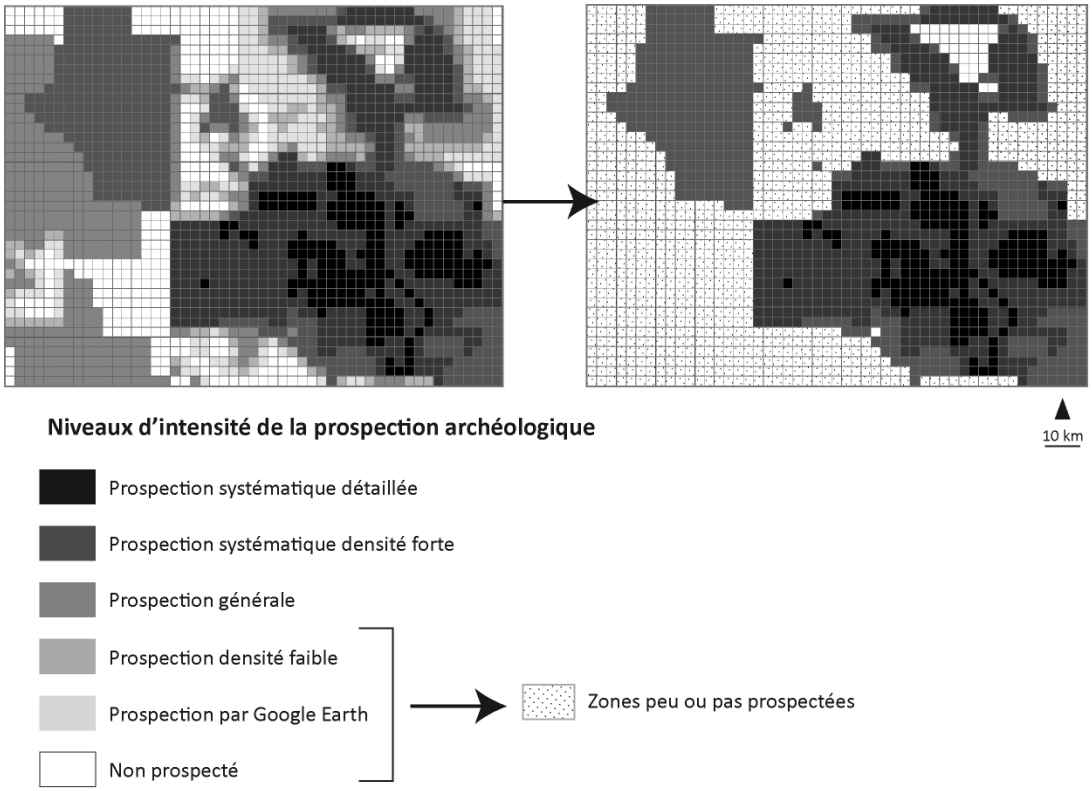


Figure 96 - Identification des zones dites "peu ou pas prospectées" représentées sur les figures suivantes.

2.3.4 Régionalisation floue des différentes configurations spatio-temporelles du changement

L'approche de régionalisation qui est ici menée s'inscrit à nouveau (cf. partie 2, chapitre 6) dans le cadre conceptuel des *espaces flous*. En effet, l'intégration des divers niveaux temporels de précision de l'information, et de fiabilité thématique de l'information nous ont conduit à différencier le « cœur » de *l'espace géographique flou*, c'est-à-dire « le sous-espace qui lui appartient entièrement et sans ambiguité » (Rolland-May, 1987) et les « franges », « représentées par le sous-ensemble dont les composantes appartiennent plus ou moins à cet espace » (Rolland-May, 1987), c'est-à-dire les *limites floues* de l'espace géographique.

Les notions de « cœur » ou de « franges » spatiales ne font donc pas ici référence à un mode d'occupation du sol, mais définissent l'incertitude liée aux sous-espaces définis par l'intermédiaire du calcul des LISA. Afin de distinguer les deux modes d'occupation du sol et ses dynamiques, nous avons donc conservé la terminologie des LISA en identifiant des *hot-spots* (« noyaux » de concentration du peuplement) et des *spatial outliers* (peuplement plus dispersé) pour chaque type de dynamique observée (apparition, disparition, stabilité des sites). Le cœur de la zone est donc constituée des *hot-spot*s et *outliers* élaborés à l'aide des données fiables uniquement, tandis que les franges sont constituées des *hot-spots* et *outliers* qui apparaissent dès lors qu'on introduit les données moins fiables dans l'analyse (Figure 97, Figure 98 et Figure 99).

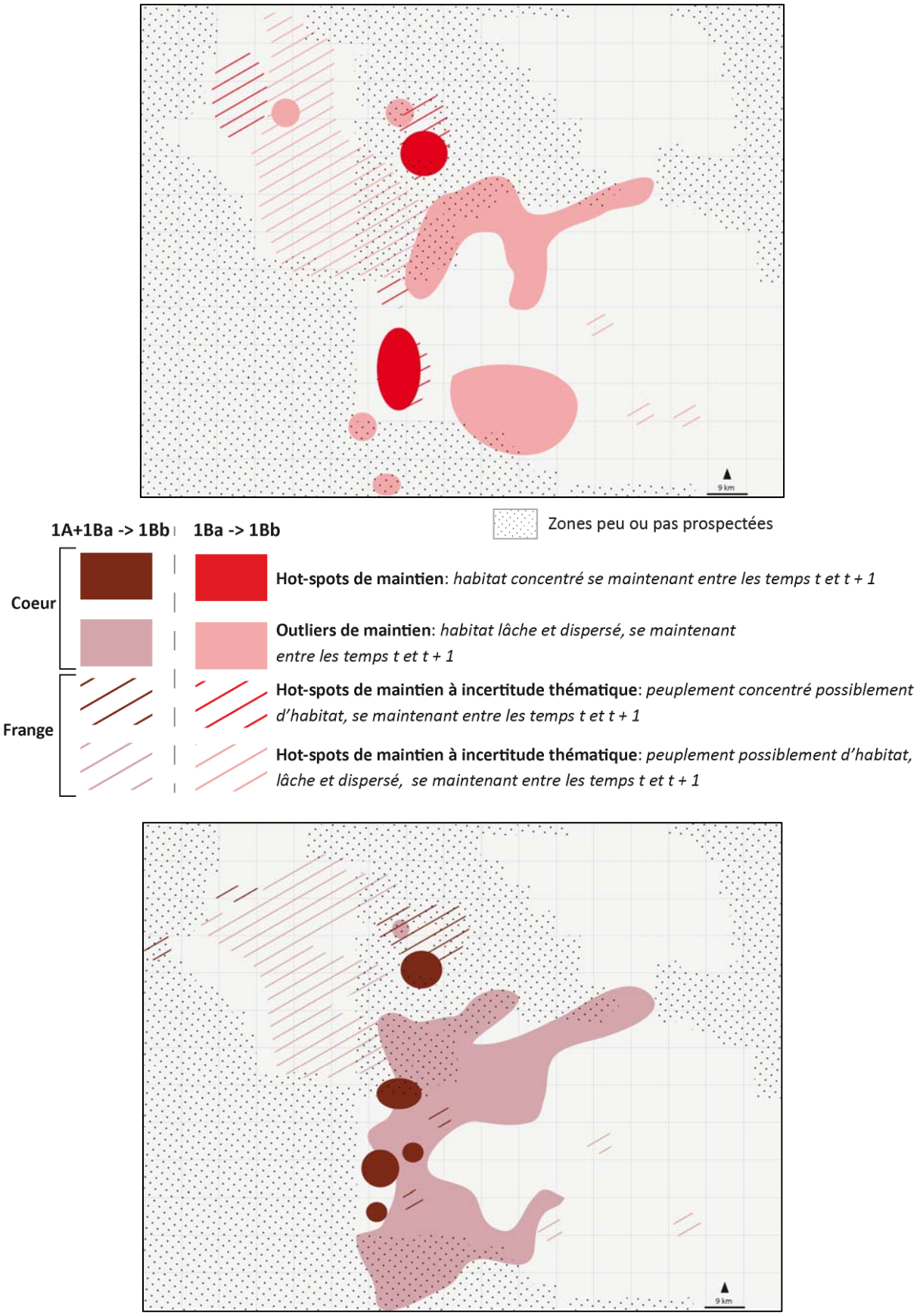


Figure 97 – Zones *floues* de stabilité à partir de deux niveaux temporels

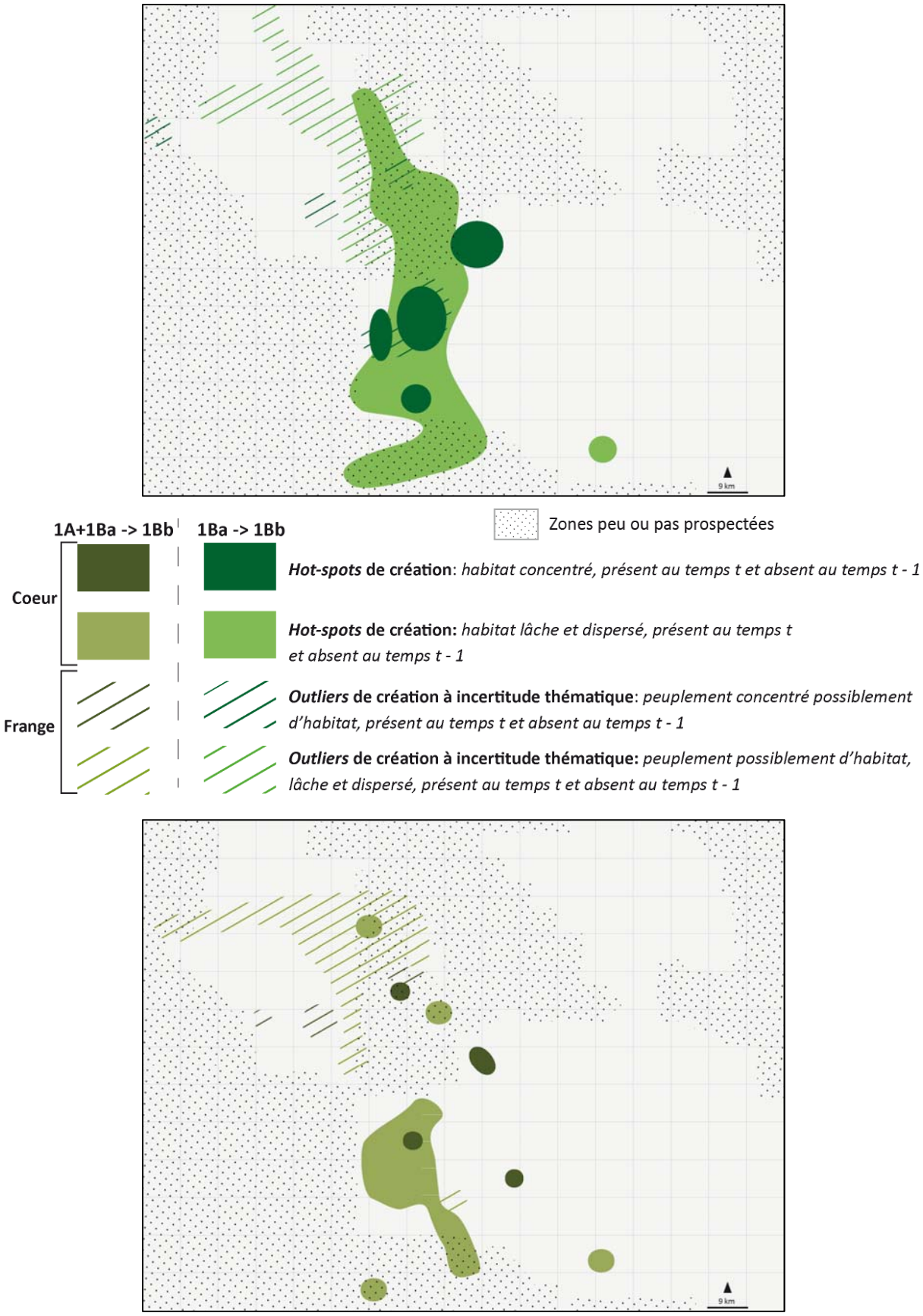


Figure 98 - Zones *floues* d'apparition à partir de deux niveaux temporels

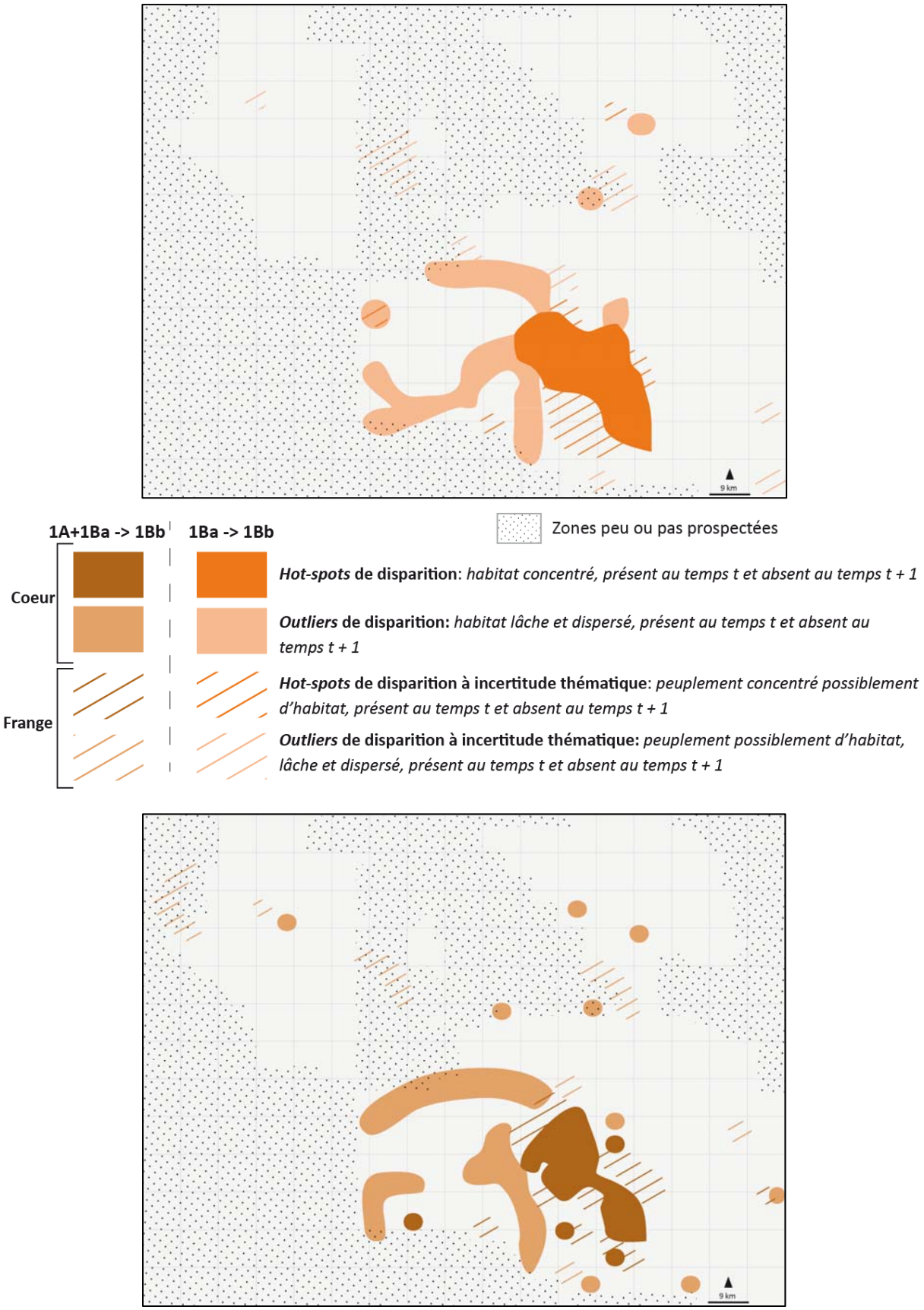


Figure 99 - Zones *floues* de disparition à partir de deux niveaux temporels

Les informations ci-dessus peuvent également être visualisées non plus par type de dynamique mais par type de configuration spatiale du changement (*hot-spots* ou *outlier*s) (Figure 101 à Figure 104). Cela permet de mettre en évidence les différentes configurations de l'espace géographique flou tel que présenté sur la Figure 100.

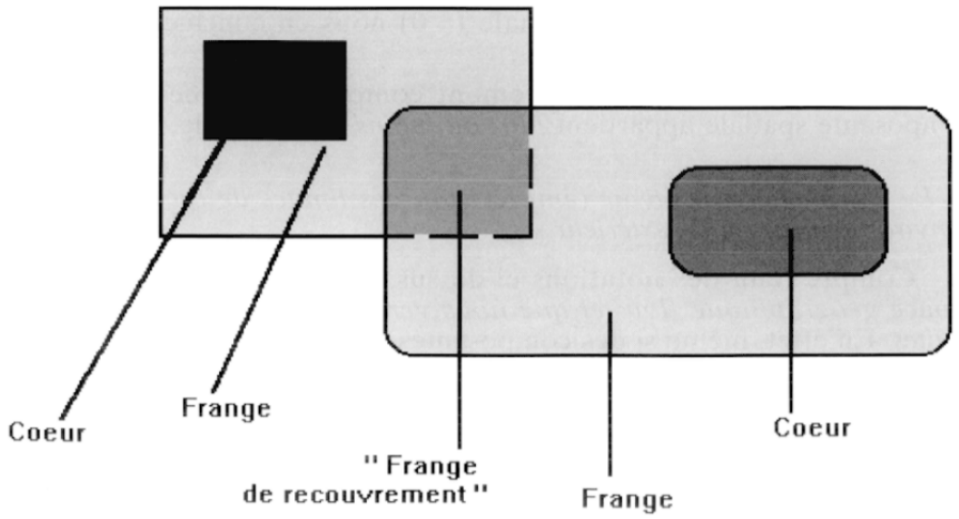


Figure 100 - Configuration d'un *espace géographique flou* (Rolland-May, 1996).

Dans notre cas, le « recouvrement » évoqué sur cette figure peut à la fois concerner le cœur et les franges de l'espace étudié : une zone peut par exemple être simultanément un *hot-spot* -ou un *outlier*- de maintien et de création.

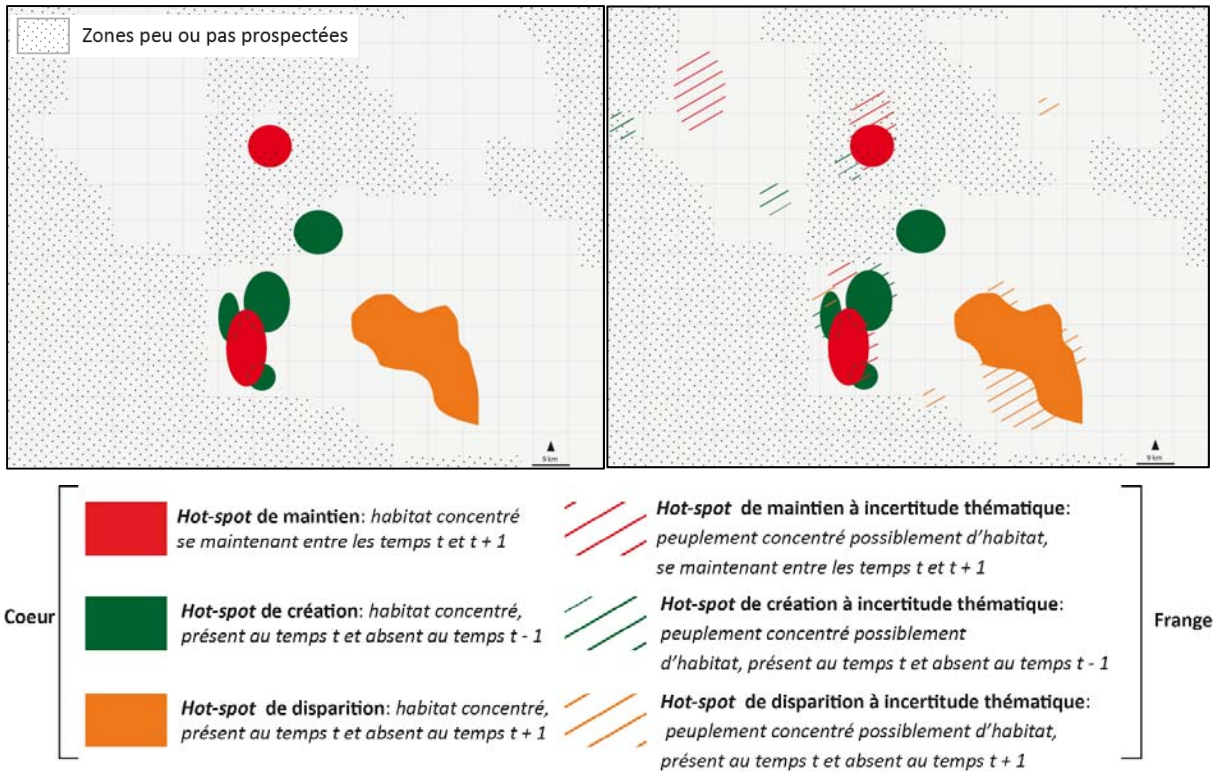


Figure 101 – Les *hot-spots flous* de changement ou de stabilité entre les *temps* 1Ba et 1Bb

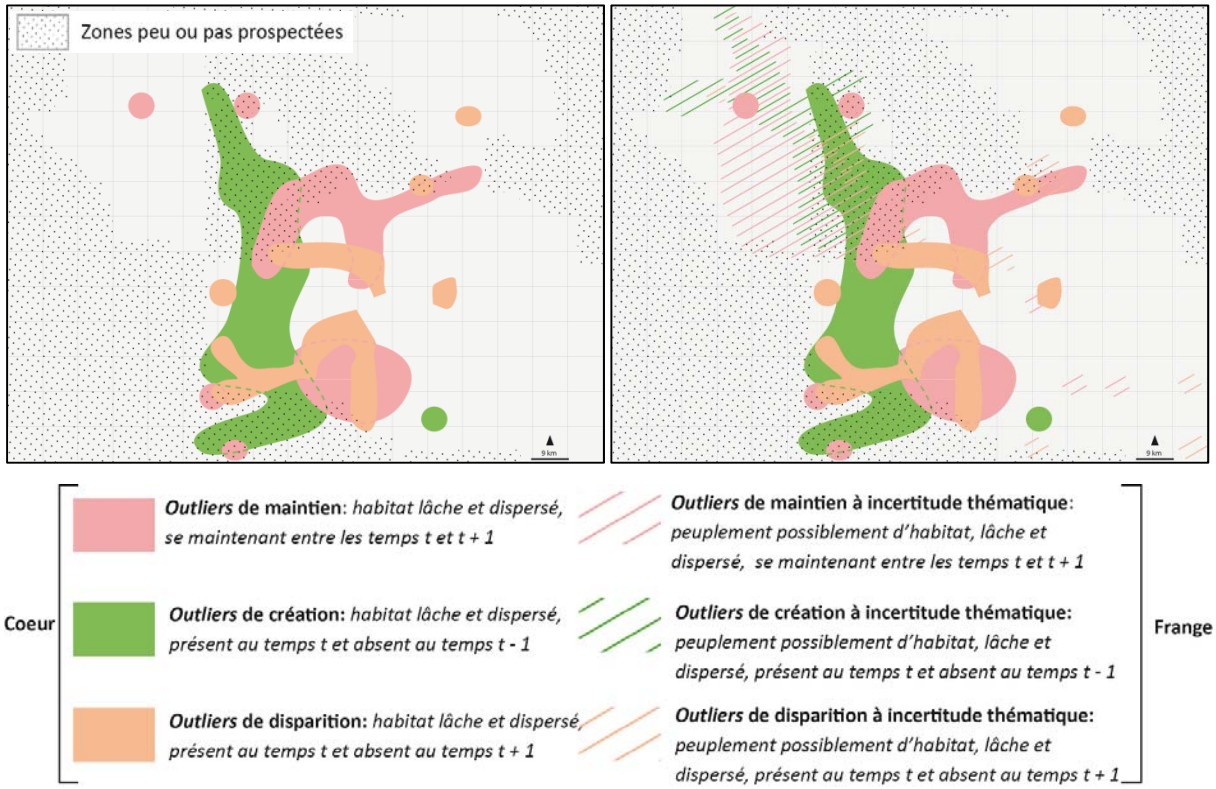


Figure 102 - Les *outliers flous* de changement ou de stabilité entre les *temps* 1Ba et 1Bb

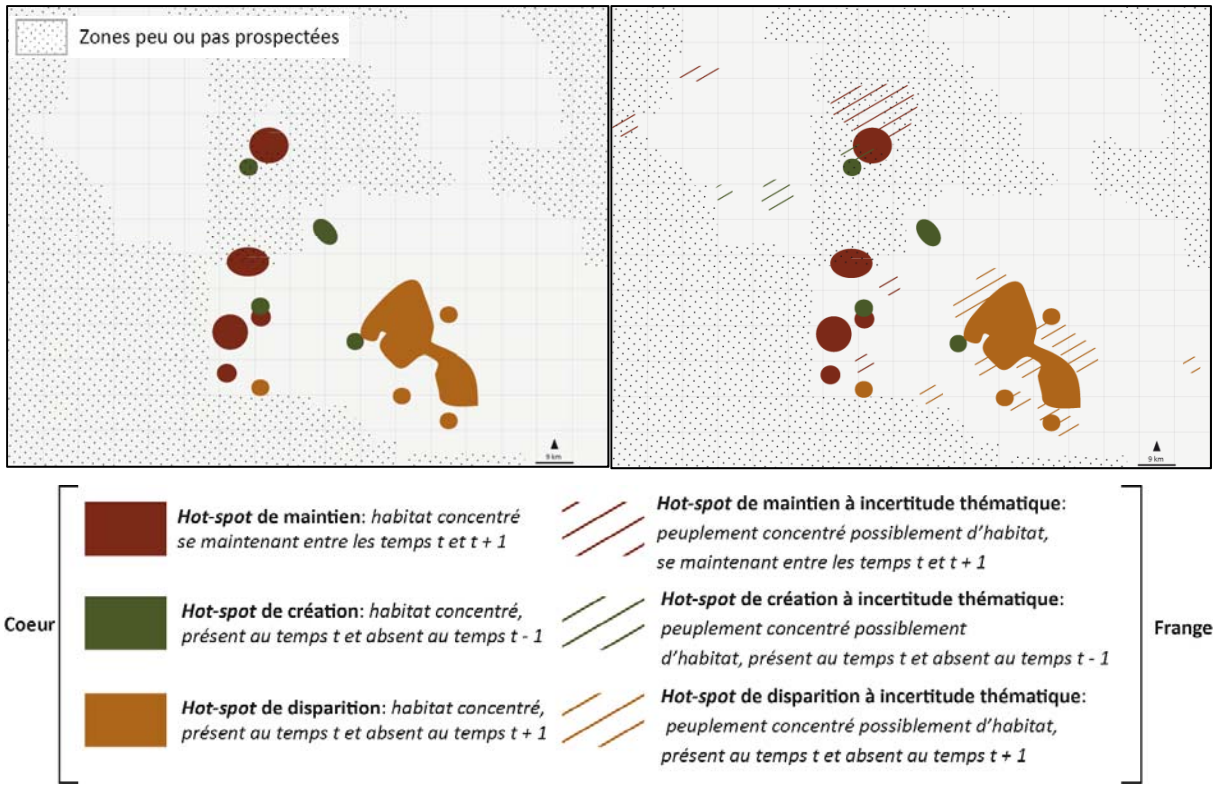


Figure 103 - Les *hot-spots flous* de changement ou de stabilité entre les *temps* 1A+1Ba et 1Bb

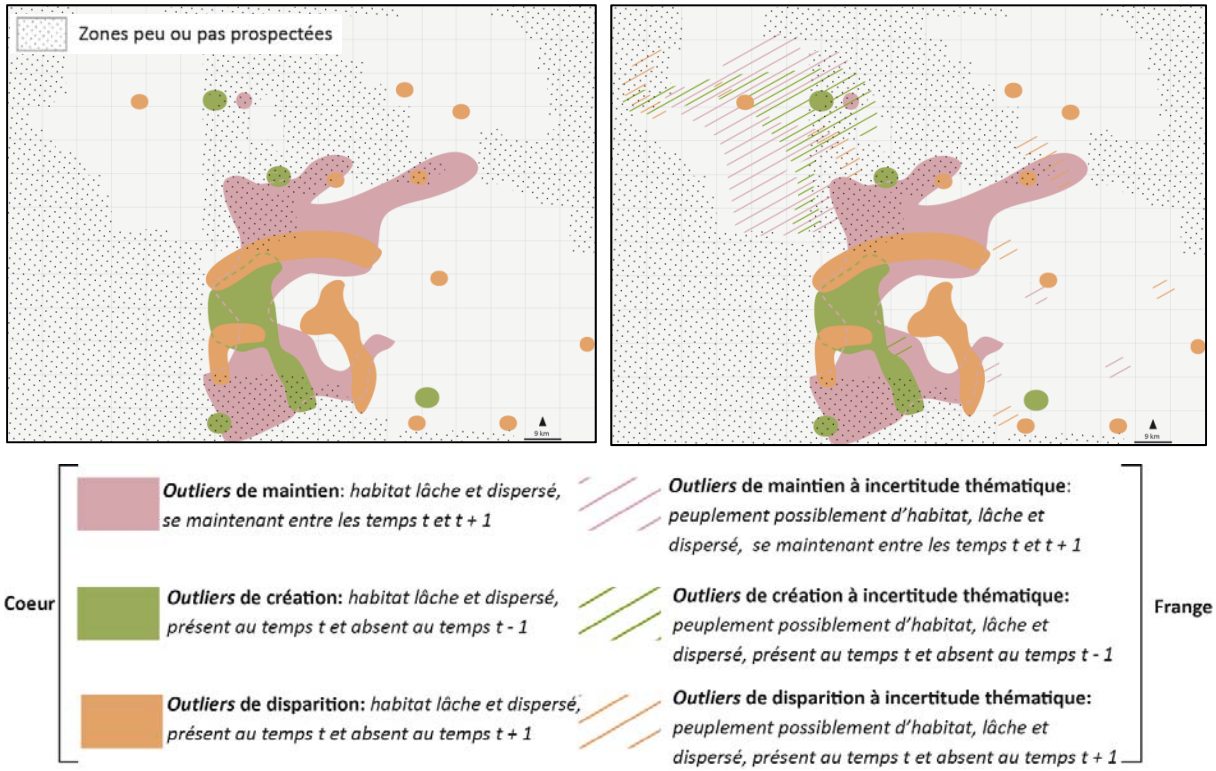


Figure 104 - Les *outliers flous* de changement ou de stabilité entre les *temps* 1A+1Ba et 1Bb

Les *hot-spot*s de création et de stabilité des sites sont alignés dans un même couloir Nord-Sud au centre de la carte (Figure 97, Figure 98 et Figure 101), avec une forte concentration dans la partie basse de ce couloir, et s'étendent possiblement en direction du Nord-Ouest si l'on considère les sites les moins fiables. La zone de disparition des sites située plus au Sud-Est (Figure 99 et Figure 101) est quant à elle, très concentrée, concentration renforcée par l'introduction des « franges » dans l'observation (Figure 99 et Figure 102). La prise en compte du niveau temporel 2 (1A+1Ba) ne remet pas en cause ces observations (Figure 103 et Figure 104).

Les *outliers* « cœur » de création sont pour la grande majorité alignés sur ce même couloir Nord-Sud (Figure 102 et Figure 104). Mais les *outliers* de stabilité s'étendent quant à eux bien plus vers l'est, jusqu'au sein même du *hot-spot* de « disparition » des sites (Figure 101 et Figure 102). En outre, les *outliers* de disparition s'étendent vers l'Ouest, au sein des *hot-spots* et *outliers* de création (Figure 101 et Figure 102). Ces observations sont renforcées par l'observation du niveau temporel 2 : les *outliers* de maintien, de création et de disparition des sites sont très mélangés au centre de la carte (Figure 103 et Figure 104).

En outre, si nous pouvons observer une rétraction (et une diminution) du peuplement de l'Est vers l'Ouest entre les *temps* 1Ba (ou 1A+1Ba) et 1Bb (Figure 97 à Figure 104), celui-ci ne semble pas de prime abord s'étendre plus à l'intérieur des terres vers l'Ouest qu'il ne l'était au *temps* 1Ba. Cette observation est en réalité biaisée par le fait que les zones à l'Ouest aient été bien moins intensément prospectées que celle situées à l'Est. Il nous est donc impossible à ce stade de la prospection, de savoir si la quantité de sites disparus à l'Est entre les *temps* 1Ba et 1Bb s'est reportée dans les mêmes proportions vers les zones moins bien prospectées à l'Ouest, impliquant que la baisse du nombre de sites entre les deux *temps* serait un artefact dû à la prospection. Il nous est en outre également impossible de savoir si la zone Ouest était déjà peuplée au *temps* 1Ba, et donc si le peuplement au *temps* 1Bb s'est étendu sur des zones non peuplées auparavant à l'Ouest, s'il s'agissait de zones déjà peuplées, ou si le peuplement du *temps* 1Bb s'est tout simplement réduit –comme le suggèrent les données- sans s'étendre considérablement vers l'intérieur des terres.

On voit donc ici l'intérêt d'une régionalisation basée sur la configuration des structures spatiales : si les *hot-spots* nous indiquent des phénomènes extrêmement sectorisés (des sites qui demeurent et qui apparaissent dans une même zone située plus à l'Ouest, une grande concentration de sites qui disparaissent plus à l'Est) pouvant nous faire penser à un phénomène de rétraction du peuplement vers les terres plus arrosées de l'Ouest suite à une péjoration climatique par exemple, les *outliers* nous indiquent que des sites plus dispersés ne se conforment pas à ce zonage des

dynamiques. En outre, si le peuplement « cœur » semble, à l'échelle de notre zone d'étude, occuper la portion centre de la carte, les franges nous montrent que celui-ci pourrait s'étendre bien plus au Nord et à l'Ouest, et d'autant plus si l'on considère les zones non prospectées et qui, possiblement, pourraient avoir été peuplées.

On constate en outre sur ces cartes que les franges, et donc les zones de « recouvrement » de l'espace *flou* sont de multiples natures : l'incertitude thématique (fiabilité de l'habitat), temporelle (niveau temporels 1 et 2) et spatiale (intensité de la prospection) s'ajoutent plus ou moins sur l'espace étudié et déclinent l'information en diverses combinaisons d'incertitude plus ou moins intenses selon la « quantité » d'information incertaine.

Les franges mises ici en évidence dépassent ainsi l'appellation de « franges spatiales » et peuvent être nommées « franges spatio-temporelles », leur existence s'exprimant dans une dimension spatio-temporelle et non uniquement spatiale (Figure 105).

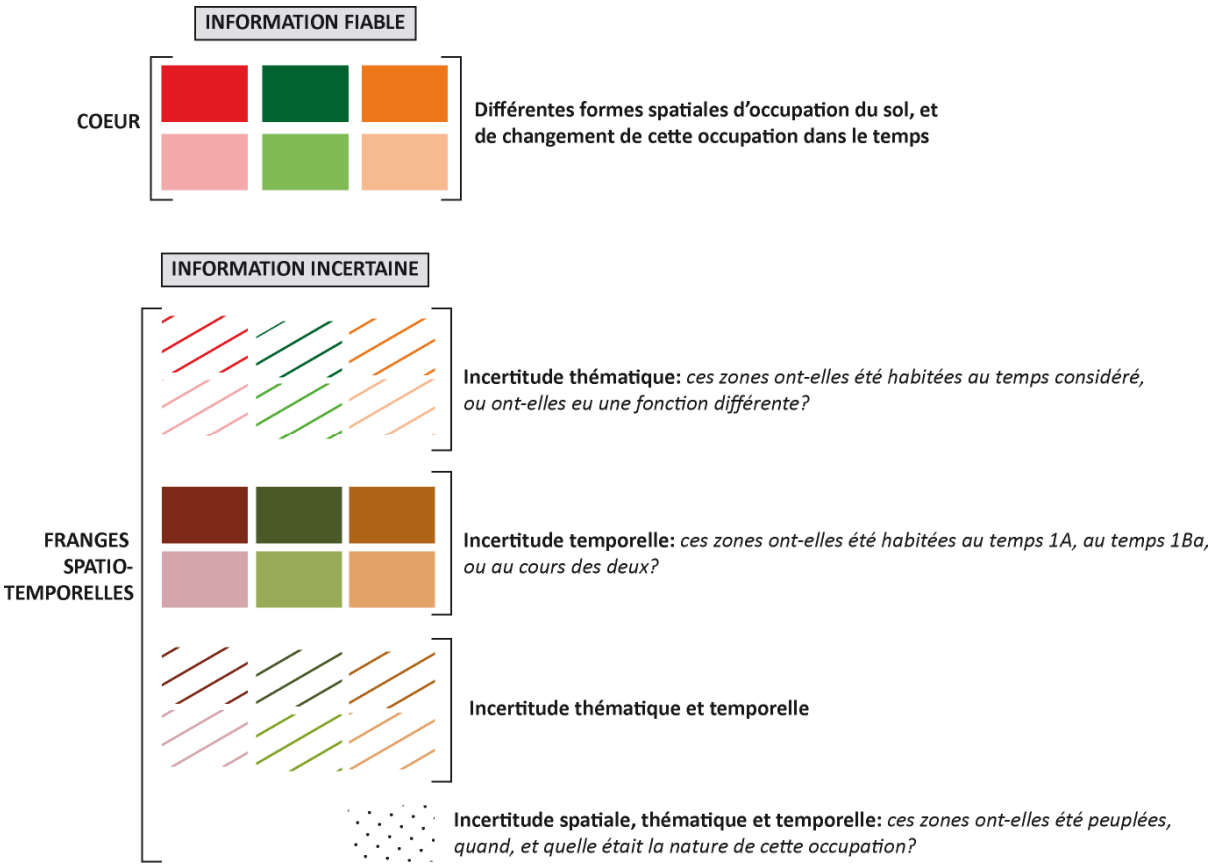


Figure 105 - Les divers niveaux d'information créés à cette étape du raisonnement.

CONCLUSION

L'objectif de régionalisation de la zone étudiée à partir des structures spatiales du changement a conduit, tout au long de ce chapitre, à un enchaînement de méthodes et de socles théoriques, tout en conservant les divers niveaux, spatiaux, temporels et d'incertitude auxquels s'expriment les données (Figure 106). Une telle démarche devait ainsi inévitablement nous amener à envisager le cadre théorique du *flou* : les possibilités qu'offre celui-ci en termes de conceptualisation et de visualisation (nous n'en sommes pour le moment qu'à ce stade) mais aussi de traitement de l'incertitude permettent de ne pas rendre « encombrante » la diversité des niveaux à prendre en considération, mais de transformer ceux-ci en une véritable valeur ajoutée à l'ouverture du champ des possibles proposée par les résultats et à notre marge de manœuvre. Si une vision simplificatrice des structures spatio-temporelles et de leurs dynamiques est certes inévitable, notamment parce-que que la résolution temporelle à laquelle nous travaillons masque notre perception des processus, envisager des résultats *plus ou moins flous* nous évite l'égarement dans le fixisme de fausses certitudes, ou au contraire dans une attitude de prudence extrême, à une restriction excessive du champ des possibles.

Ce prolongement du champ des possibles sera envisagé dans le chapitre suivant, où le *flou* ne sera plus considéré dans une dimension uniquement qualificative de structures spatio-temporelles, mais comme un moyen d'évaluer les « passés possibles » du peuplement, tout en explorant les implications thématiques et méthodologiques des régionalisations proposées par le calcul des LISA : si leurs dynamiques spatio-temporelles semblent diverger, les *hot-spots* et les *outliers* peuvent-il être envisagés comme des modes différents d'occupation du sol, relevant de logiques différentes et donc, non forcément soumis aux mêmes besoins et, éventuellement, aléas ? Pourrait-on évaluer les possibilités pour que la zone de frange située au Nord-Ouest, ainsi que les zones non prospectées, aient été également peuplées ?

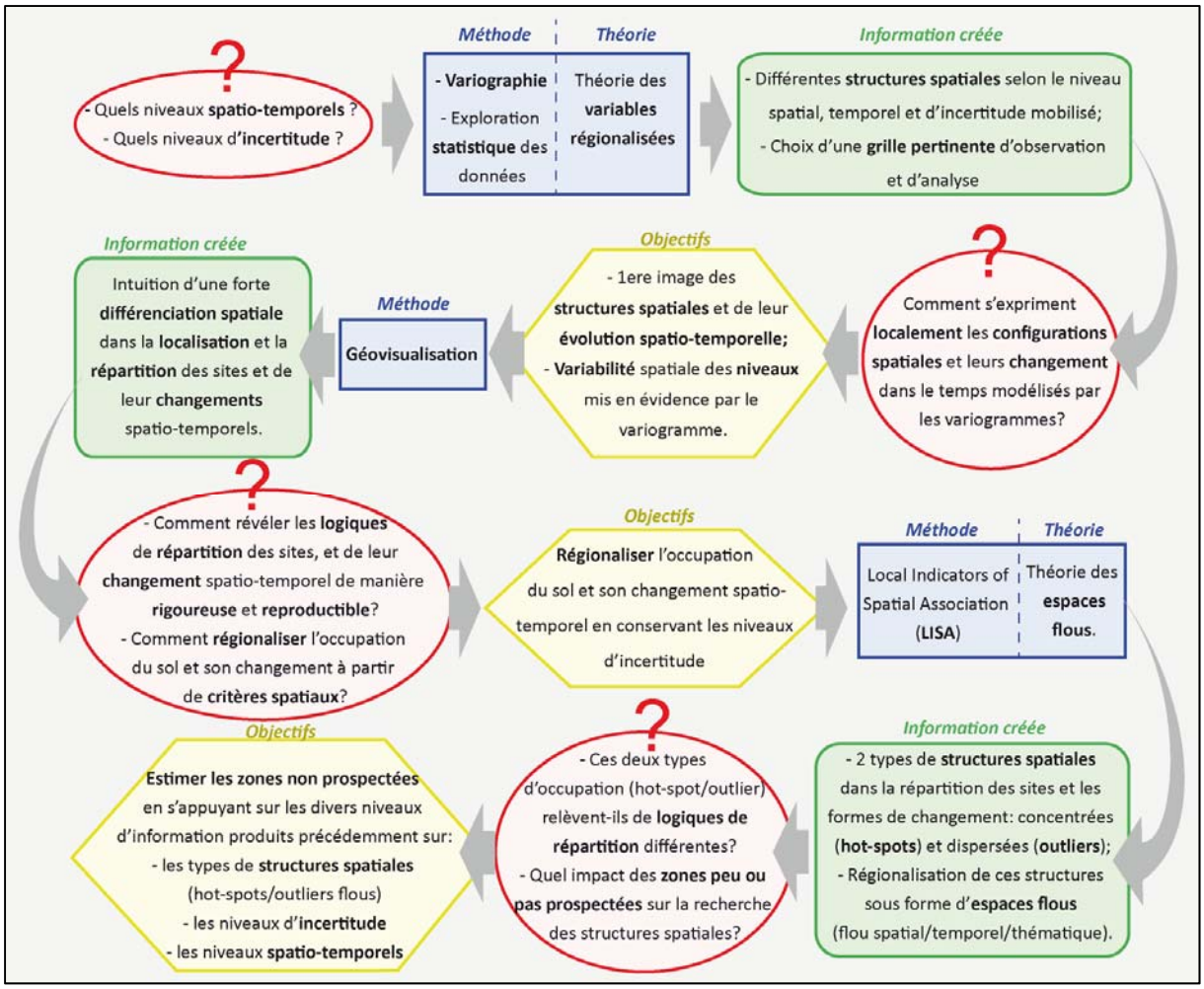


Figure 106 – Chaîne de raisonnement suivie dans le chapitre 1 de la partie III.

Chapitre 8 : Evaluation et modélisation des possibilités d'occupation du sol dans un contexte d'incertitude forte.

INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est double : son but « final » consiste en une évaluation du peuplement possible des zones de forte incertitude, c'est-à-dire les *franges* et les zones de moindre prospection. Afin d'y parvenir, une description et une évaluation des logiques de localisation des sites connus seront nécessaires, dans le but de bâtir les *possibles* sur des critères empiriques, basés sur l'observation des tendances et des régularités dans la répartition des phénomènes, et non uniquement théoriques. Cette compréhension des logiques est donc envisagée à la fois comme un moyen (pour évaluer le peuplement des zones non prospectées) mais également comme une « fin » à part entière, dans le but de comprendre si la distinction de *hot-spots* et d'*outliers*, et donc la régionalisation établie précédemment sur la base des structures spatiales détectées par le calcul des LISA, se justifie d'un point de vue thématique et comment elle se décline dans ses relations avec l'environnement, dans l'espace et dans le temps.

1. METHODE D'APPREHENSION DE L'INCERTITUDE FORTE PAR LA THEORIE DES POSSIBILITES

1.1 Quels niveaux d'information conserver dans la recherche des logiques d'occupation du sol?

Comme cela a déjà été mentionné, notre objectif consiste à appréhender les logiques de localisation des sites archéologiques afin d'estimer les zones de peuplement possibles sur l'ensemble de la zone étudiée. Ces logiques ne seront toutefois pas appréhendées à partir de critères théoriques ou présumés, mais évalués de manière empirique à partir de la localisation des sites connus.

Au vu des résultats obtenus dans le chapitre précédent, nous postulons (et souhaitons vérifier) que les logiques de localisation des sites diffèrent en fonction de critères à la fois thématiques et relatifs aux données:

- Du temps considéré : le contexte socio-environnemental dans lequel évoluent les peuplements passés ayant pu évoluer d'un temps à l'autre, il est également fortement possible que les besoins et les priorités de ces populations aient évolué. Ainsi, toute modélisation du peuplement possible ne peut s'effectuer que du point de vue d'une période donnée, et n'est valable que pour cette période.
- Du type de configuration spatiale à laquelle les sites appartiennent (*hot-spot* ou *outlier*) : si l'on postule que ces deux types de configurations spatiales révèlent des modes d'occupation et éventuellement d'utilisation du sol différents, les peuplements qui y sont associés peuvent également relever de logiques de localisation différentes.
- Du niveau temporel considéré : selon le niveau d'observation temporel, on ajoute de nouveaux sites (attachés au *temps* 1A+1Ba) pouvant, en fonction de leur localisation, faire varier les grandes tendances d'occupation du sol observées.
- Du niveau de fiabilité des données considéré : selon le seuil de fiabilité des données pris en compte, on ajoute ou on retranche des données à l'analyse qui, tout comme pour l'ajout d'un second niveau temporel, peuvent faire varier les tendances observées dans l'occupation du sol.

Chacun de ces niveaux d'information sera donc pris en compte dans l'évaluation des logiques d'occupation du sol.

1.2 Le choix de la logique floue pour la modélisation de connaissances incertaines

D'après L. Gacôgne (2003) « la logique floue, ou plus généralement le traitement des incertitudes, a pour objet d'étude la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché ». Pourtant encore très peu adopté en archéologie (cf chapitre 1) nous postulons que ce cadre théorique et méthodologique est particulièrement adapté à ses problématiques, notamment lorsqu'il s'agit de modéliser le peuplement inconnu sur des zones peu prospectées à partir de connaissances elles-mêmes incertaines (c'est-à-dire ce que l'on appelle communément « l'archéologie prédictive »).

1.2.1 Logique floue et possibilités versus probabilités : quel cadre théorique choisir ?

Le cadre envisagé dans le traitement de l'incertitude en archéologie (mais aussi souvent en géographie) est bien souvent celui des probabilités (cf chapitre 1). L'explication qui suit prend l'exemple de l'estimation de la localisation de sites archéologiques envisagée dans le cadre de la

théorie des probabilités et des possibilités, afin de montrer la différence essentielle qui réside entre les deux approches et de justifier notre choix de la théorie des possibilités.

Dans le cadre de la théorie des probabilités, la somme des probabilités de la localisation d'un site archéologique est obligatoirement égale à 1, et toutes les alternatives doivent être connues et évaluées quantitativement. Ainsi, la probabilité de localisation d'un site n'est pas une valeur intrinsèque de sa propre incertitude, mais une valeur relative à la probabilité de localisation des autres sites. Dans le cadre de la théorie des possibilités, la possibilité de localisation d'un site A n'influe pas sur la possibilité de localisation des autres sites : celle-ci est une valeur intrinsèque à la localisation du site A. De ce fait, l'ensemble des possibilités de l'ensemble des sites n'est généralement pas égal à 1. Zadeh (1978) utilise un exemple simple pour illustrer la différence entre les probabilités et les possibilités, et propose de considérer l'assertion: « Hans a mangé X œufs au petit déjeuner ». L'incertitude de X est évaluée dans le Tableau 23.

Tableau 23 - Logique de possibilités et de probabilités, l'exemple des œufs au petit déjeuner (Dutozia, 2013 d'après Zadeh, 1978).

NOMBRE D'ŒUFS	1	2	3	4	5	6	7	8
POSSIBILITE π x (u)	1	1	1	1	0,8	0,6	0,4	0,2
PROBABILITE P x (u)	0,1	0,8	0,1	0	0	0	0	0

On constate ainsi que si la possibilité pour que Hans ait mangé 3 œufs est de 1, la probabilité pour qu'un tel évènement se produise et faible, de 0.1. Ainsi, un faible degré de possibilité n'implique pas forcément un faible degré de probabilité (et inversement). Cependant, si un évènement est impossible, on peut supposer qu'il est improbable.

On voit également que le cadre des probabilités offre un ensemble bien plus restreint de choix que celui des possibilités au nombre d'alternatives plus ouvert, correspondant en fait au cône des localisations probables de sites modélisées classiquement en archéologie « prédictive ». Le tableau ci-dessus nous apprend cependant que certains évènements improbables sont des réalités tout à fait possibles : la théorie des possibilités permet ainsi, au-delà des situations les plus habituelles (également prises en compte par les probabilités) où X = 1 à 3, de prendre en compte des situations plus inhabituelles (X = 4 à 8), peut être rares, mais possibles exceptionnellement.

Face au haut degré d'incertitude auquel nous sommes confrontés dans les problématiques archéologiques et dans l'évaluation des « passés possibles », l'utilisation de méthodes plus

ouvertes que le cadre des probabilités doit être adoptée. Notamment parce-que ce dernier suppose, en amont une connaissance en amont presque exhaustive du système envisagé, ce dont nous ne pouvons nous targuer. Le cadre des possibilités offre l'opportunité d'intégrer dans l'estimation du peuplement certains facteurs de localisation de sites dont on assume ne pas connaître précisément l'ensemble des composantes et des relations possibles.

P. F. Fisher (2005) distingue les cas où les probabilités et la logique floue (sur laquelle se base la théorie des possibilités) peuvent être mobilisées : « If both the class and the individual are well defined then the uncertainty is caused by errors and is probabilistic in nature. (…) If the uncertainty is attributable to poor definition of class of object or individual object then definition of a class or set within the universe is a matter of vagueness, and this can conveniently be treated with fuzzy set theory ».

1.2.2 Définition d'un sous-ensemble flou

La logique floue a « donné lieu à toute une généralisation des mathématiques classiques fondée sur le concept très simple de sous-ensemble flou » (Gacôgne, 2003).

Un ensemble classique comporte des éléments qui satisfont l'ensemble des propriétés précises. Ainsi, les éléments qui ne satisfont pas ces propriétés ne peuvent appartenir à cet ensemble. De manière plus formelle, un sous-ensemble A d'un ensemble de référence X peut être décrit par sa fonction caractéristique$\chi\mathrm{A}: X \rightarrow \{0, 1\}$ de la manière suivante (Bouchon-Meunier et al., 2003) :

$$\chi\mathrm{A}\,(x) = \begin{cases} 1 & si\ x \in A \\ 0 & sinon \end{cases}$$

Par exemple le sous-ensemble A des âges compris entre 20 et 40 ans a pour fonction caractéristique :

$$\chi\mathrm{A}\,(x) = \begin{cases} 1 & si\ 20 \leq x \leq 40 \\ 0 & sinon \end{cases}$$

Le graphe de cette fonction est représenté dans la Figure 107.

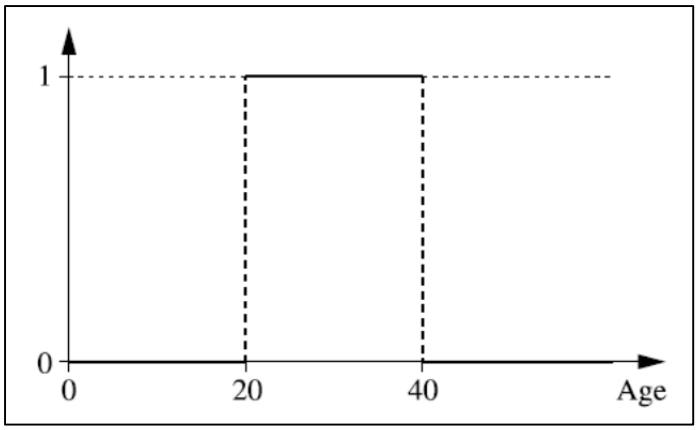


Figure 107 - Fonction caractéristique de l'ensemble A (Bouchon-Meunier et al., 2003)

Si l'on considère désormais un ensemble B des âges avoisinant les 30 ans, la propriété *avoisinant les 30 ans* n'est pas précise : ainsi, contrairement au cas évoqué plus haut, B ne peut être caractérisé par une fonction caractéristique qui séparerait en deux les âges avoisinant les 30 ans de ceux qui ne les avoisinent pas.

Une généralisation de la fonction caractéristique en *fonction d'appartenance* est alors nécessaire dans le but de considérer les âges qui ne sont pas trop éloignés des 30 ans, sans en être vraiment proches non plus. Cette nouvelle fonction permet alors de mettre en évidence les nuances d'appartenance des éléments de l'ensemble de référence X, et de définir un sous-ensemble flou (on dit aussi *ensemble flou* pour simplifier) de X.

La définition d'un sous-ensemble-flou donnée par Bouchon-Meunier et al. (2003) est la suivante :

« Un sous-ensemble flou F de X est défini par une fonction d'appartenance $\boldsymbol{\mu F}$ qui associe à tout élément $\boldsymbol{x}$ de X une valeur réelle $\boldsymbol{\mu F}\ (\boldsymbol{x})$ dans l'intervalle [0, 1].

Ainsi, un sous-ensemble flou est toujours (et seulement) une fonction de X dans [0, 1] ».

La Figure 108 donne un exemple de graphe d'une fonction d'appartenance possible pour l'ensemble B.

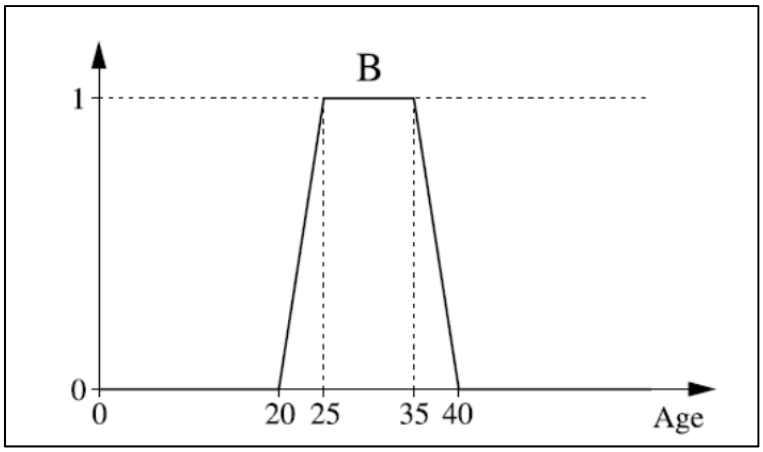


Figure 108 - Fonction d'appartenance de l'ensemble B pour la propriété *avoisinant les 30 ans* (Bouchon-Meunier et al., 2003)

La modélisation de ce que Zadeh (1975) nomme des « variables linguistiques » est ainsi une possibilité offerte par la logique floue.

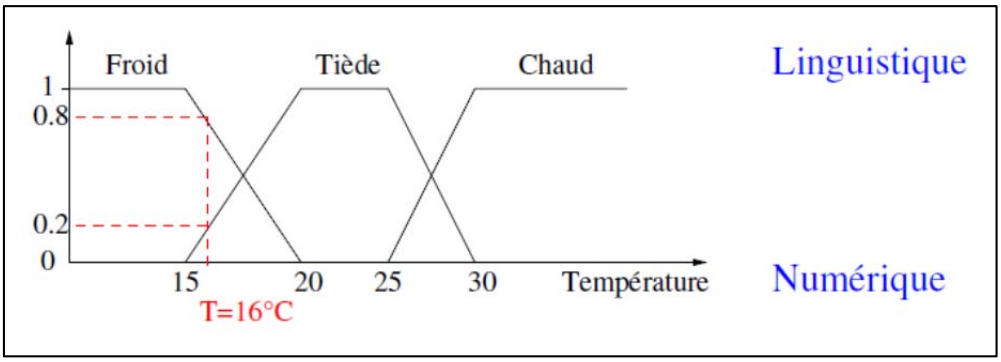


Figure 109 – Exemple d'ensembles flous de la variable *Température* (Guillaume, Charnomordic, 2013)

La Figure 109 montre un exemple de variable linguistique « température » avec trois termes linguistiques, « froid », « tiède », « chaud ». Ainsi, la valeur numérique de température 16°C peut être considérée comme « froide » avec un niveau de 0,8 et comme « tiède » à un niveau de 0,2. Elle n'est pas considérée comme chaude.

1.3 Le choix d'une démarche empirique et exploratoire

La démarche adoptée consiste ainsi à évaluer les paramètres ayant pu entrer en compte dans les préférences de localisation des sites (pour chacun des différents niveaux mentionnés en 1.1), puis à partir de l'observation de ces critères sur l'ensemble de la zone étudiée, transposer ces observations en termes de possibilités d'occupation des zones non prospectées en fonction des caractéristiques de ces zones.

Notre démarche se base donc sur des critères empiriques, et diffère en cela de la démarche adoptée par Bernard Geyer dans l'élaboration de la carte d' « attractivité » pour les Marges Arides (Figure 10), recouvrant une partie de l'espace étudié. L'appréciation des niveaux d' « attractivité » repose en effet sur une évaluation experte des critères théoriques dont on suppose qu'ils aient joué un rôle dans la localisation préférentielle des sites en un lieu donné plutôt qu'un autre. Ce modèle théorique est ensuite confronté à la localisation des sites par période, afin d'en vérifier la validité. Notre démarche est complémentaire à celle-ci en ce que l'évaluation des critères ne se réalise pas par connaissance experte de manière théorique mais en se basant sur les aspects de la localisation des sites connus et en en inférant des possibilités de localisation de sites dans les zones à prospecter.

La démarche est exploratoire en ce que la corrélation entre les critères à tester (c'est-à-dire, les informations dont nous disposons afin d'évaluer les préférences de localisation des sites) et la localisation des sites est évaluée statistiquement en amont du calcul des possibilités. Il s'agit donc en tout premier lieu, de tester l'impact des divers critères dont on suppose qu'ils aient pu jouer un rôle dans la localisation des sites, afin de sélectionner les plus pertinents.

Selon Hans Kamermans (2006), il semblerait que la démarche adoptée ici corresponde à ce que l'on appelle une démarche "inductive" en archéologie "prédictive" : « With the inductive approach to predictive modeling, a model is constructed on the basis of correlations between known archaeological find spots and attributes that are predominantly taken from the current physical landscape. It is only a predictive model when the observed correlations are extrapolated". Bien que cette définition corresponde globalement à notre démarche au sens méthodologique, les termes employés ne conviennent pas tout à fait à notre philosophie, et nous préférons nous ranger au discours de Thomas G. Whitley (2006), selon lequel "We should not characterize probabilistic modeling with the simplified and incorrectly applied terms of "inductive" and "deductive". Similarly, I have replaced the term "predictive" with "probabilistic" to reflect a greater degree of indeterminacy" bien que la démarche employée ici soit résolument possibiliste et non probabiliste.

2. LES LOGIQUES D'OCCUPATION DU SOL : TEST DES PARAMETRES A INTEGRER

2.1 Préparation des données

2.1.1 Les données relatives aux sites

Si les analyses du chapitre précédent s'effectuaient à l'échelle de la maille, ce découpage n'est désormais plus nécessaire, puisqu'il s'agit de tester la localisation des sites en eux-mêmes en fonction de critères divers eux-mêmes situés dans l'espace. Chaque site s'est donc vu attribuer la configuration spatiale à laquelle il participe, à partir des LISA calculés sur le peuplement des *temps* 1Ba, 1Bb et 1A+1Ba. Pour chacun de ces *temps*, chaque site est ainsi considéré comme relevant d'un *hot-spot*, ou comme un *outlier*.

2.1.2 Les données relatives aux critères à tester

Les données dont nous disposons afin d'évaluer les logiques de localisation des sites (et disponibles dans le SIG) sont relatives aux critères environnementaux de la zone, et correspondent aux critères « classiques » pris en compte dans les modèles d'archéologie « prédictive » (Mehrer, Wescott, 2006). Chacune d'entre elles présente un certain nombre d'avantages et d'inconvénients qui ont été pesés afin de sélectionner le ou les paramètres à tester.

- L'altitude : s'il s'agit d'un critère pouvant s'avérer dans la plupart des cas très efficace, celui-ci ne pouvait, à l'échelle de la zone étudiée, être un paramètre très discriminant et explicatif de la variabilité de la localisation des sites dans la mesure où la majorité (67%) de la zone, et notamment les zones non prospectées, est située entre 300 et 500 mètres d'altitude, et qu'aucune variabilité dans le nombre de sites n'est constatée dans cet intervalle sur ce critère. Evaluer les possibilités de peuplement sur ce critère serait donc en quelque sorte une « solution de facilité » revenant à estimer celui-ci comme fortement possible sur presque toute la zone étudiée.
- La pluviométrie : bien que nous disposions d'un modèle des pluies élaboré par des climatologues (Traboulsi, 2004) pour la zone étudiée, ce modèle se base sur des données actuelles. Nous ne disposons d'aucun modèle paléoclimatique nous permettant d'envisager ce critère dans le passé, et nous avons jugé trop dangereux pour le moment de tester la méthode envisagée sur un critère aussi hasardeux.

- Les sols : une carte des sols précise est disponible dans le SIG pour la zone étudiée, et nous pouvons considérer, érosion mise à part, que ce critère a certainement moins de variabilité entre l'actuel et le passé que la pluviométrie, par exemple. Cependant, la diversité des types de sols et l'évaluation de leur importance dans les localisations de peuplement suppose l'élaboration de typologies de sols (qui pourraient par ailleurs être élaborées à l'aide de la logique floue) que nous n'étions pas, pour le moment, en mesure de fournir, la carte d' « attractivité » disponible (Figure 13) ne couvrant pas la totalité de la zone étudiée.
- Les cours d'eau : ce critère présente l'avantage d'être localisé avec précision et fiabilité dans l'espace. En outre, s'il est établi à partir d'observations actuelles, celui-ci présente certainement moins de variabilité entre l'actuel et le passé que la pluviométrie, par exemple. C'est donc le critère que nous avons choisi de tester afin d'identifier sa corrélation avec les sites existants, et donc d'évaluer son importance dans la localisation des sites archéologiques.

2.2 Test de la corrélation entre la distance au cours d'eau et le nombre de sites par des méthodes statistiques

Le paramètre à tester est la distance des sites aux cours d'eau ; en d'autres termes, on cherche à savoir si les sites vont préférentiellement se localiser à proximité d'un cours d'eau ou si ce critère n'a aucun impact sur la localisation des sites.

A l'aide du SIG, les cours d'eau ont été transformés en buffers de 3, 6, 9, 12, 15, 18 et 21 km, et le nombre de sites contenu dans chaque buffer a été relevé (Figure 110). Le pas choisi pour l'observation des phénomènes est de 3 km : celui-ci permettait de conserver une certaine précision sans avoir de trop nombreux niveaux à manier dans l'analyse. En outre, après test sur des buffers de 1 km, ces derniers introduisaient une précision inutile dans la mesure où les sites situés entre 1 et 3 km des cours d'eau étaient répartis de façon très équilibrée entre ces trois intervalles (0-1 km, 1-2 km, 2-3 km), mais aussi une lourdeur considérable dans l'analyse.

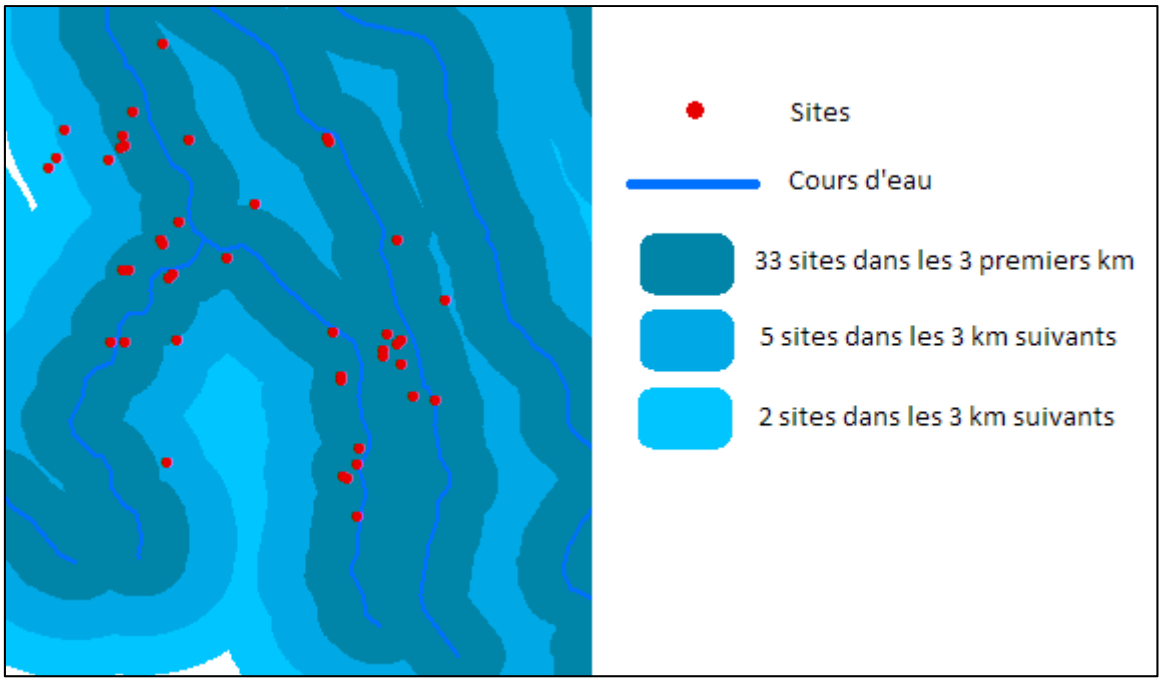


Figure 110 - Comptage du nombre de sites par zone de 3 km autour des cours d'eau.

Les résultats de ce comptage sont présentés sous forme de pourcentages sur les Figure 111, Figure 112 et Figure 113.

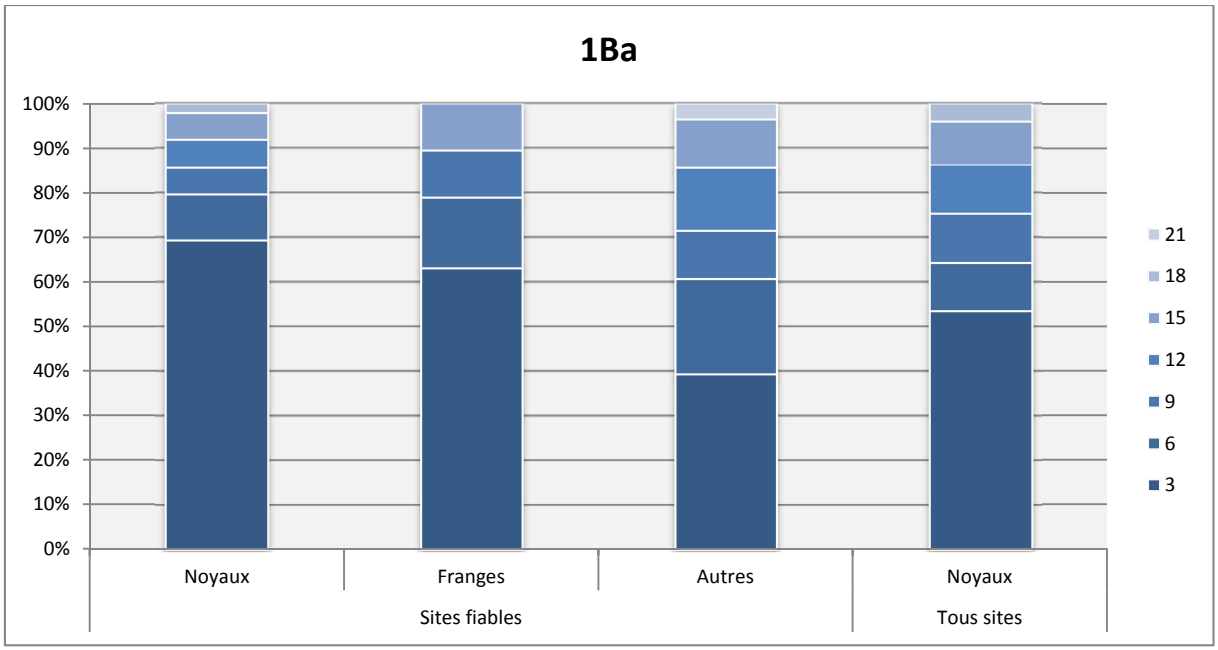


Figure 111 - Pourcentage du nombre de sites du *temps* 1Ba situés à des distances successives de 3 km des cours d'eau, pour chaque type d'occupation et niveau de fiabilité.

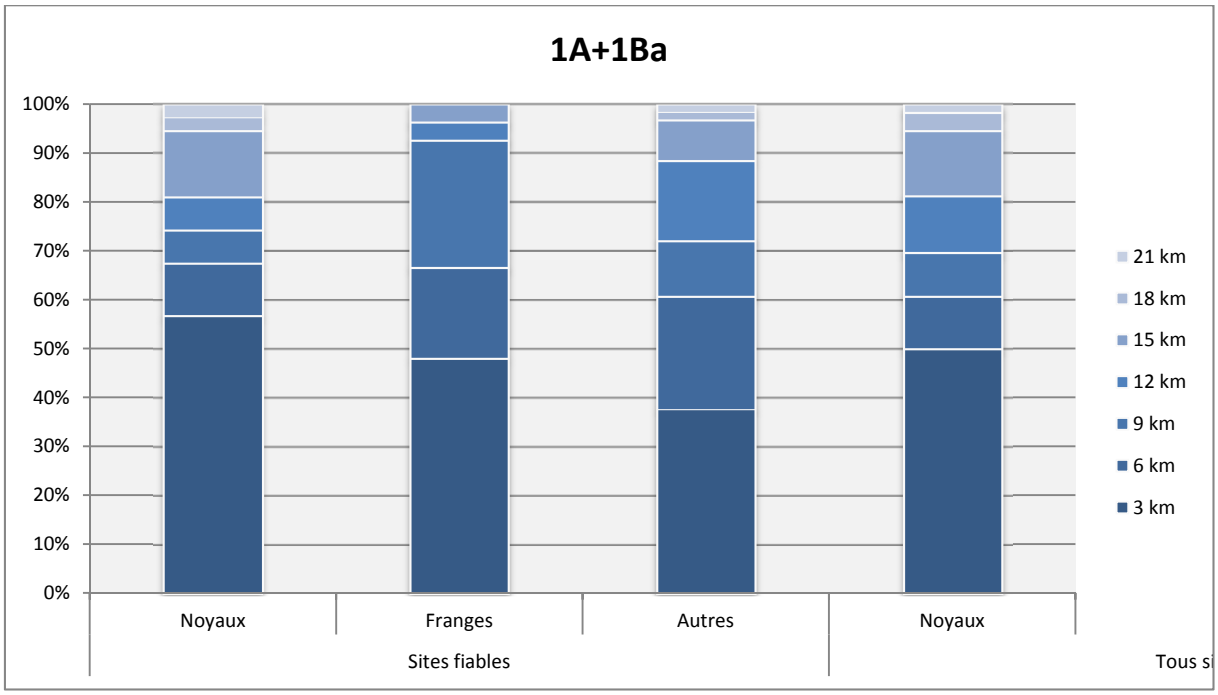


Figure 112 - Pourcentage du nombre de sites du *temps* 1A+1Ba situés à des distances successives de 3 km des cours d'eau, pour chaque type d'occupation et niveau de fiabilité.

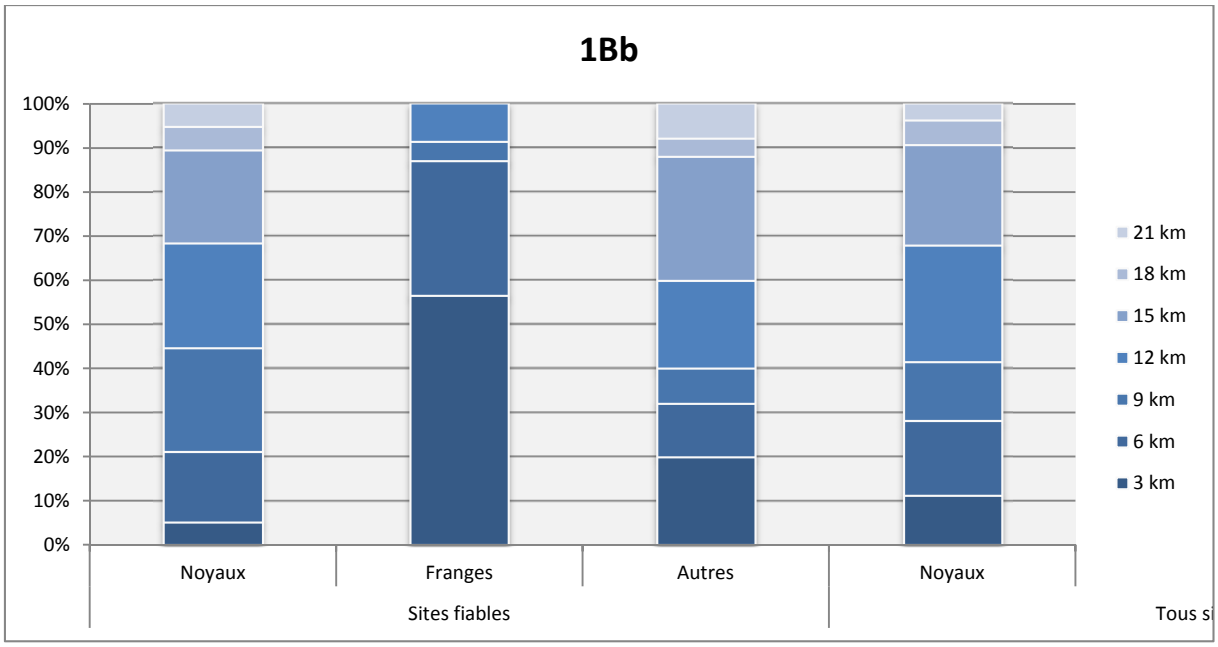


Figure 113 - Pourcentage du nombre de sites du *temps* 1Bb situés à des distances successives de 3 km des cours d'eau, pour chaque type d'occupation et niveau de fiabilité.

On peut constater que la majorité des sites fiables sont, pour le *temps* 1Ba, situés entre 0 et 6 km des cours d'eau, quelle que soit la configuration spatiale dont ils relèvent : 80% pour les *hot-spot*s et les *outliers*. L'intégration des sites non fiables abaisse quelque peu cette proportion pour les *hot-spots* (65%) mais ne change pas pour les *outliers*. En outre, le plus grand pourcentage de sites est invariablement observé entre 0 et 3 km des cours d'eau.

L'observation des sites au niveau temporel 1A+1Ba diminue quelque peu les pourcentages, mais conserve les rapports : le plus grand nombre de sites est toujours localisé entre 0 et 3 km des cours d'eau.

Le *temps* 1Bb, quant à lui, nous réservait une surprise : seuls 5% des sites fiables (10% en introduisant les non fiables) situés dans un *hot-spot* sont localisés entre 0 et 3 km des cours d'eau, au profit de l'intervalle situé entre 3 et 15 km. Quant aux *outliers*, ceux-ci atteignent en revanche des scores plus élevés que pour les temps précédents : 88% des sites fiables sont situés entre 0 et 6 km. Afin d'observer ce phénomène de plus près, nous avons réalisé un principe de comptage similaire à celui-ci mais à partir des sites qui apparaissent et qui se maintiennent entre les *temps* 1Ba et 1Bb, et entre 1A+1Ba et 1Bb (Figure 114 à Figure 117).

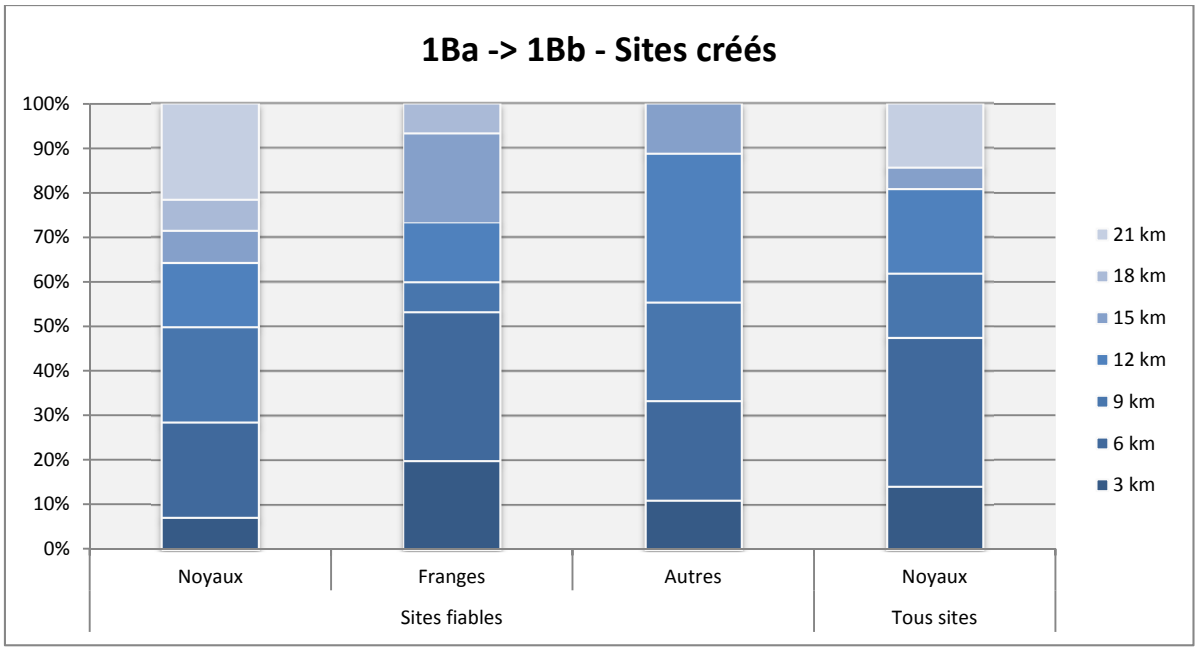


Figure 114 - Pourcentage du nombre de sites apparaissant entre les *temps* 1Ba et 1Bb situés à des distances successives de 3 km des cours d'eau, pour chaque type d'occupation du sol et niveau de fiabilité.

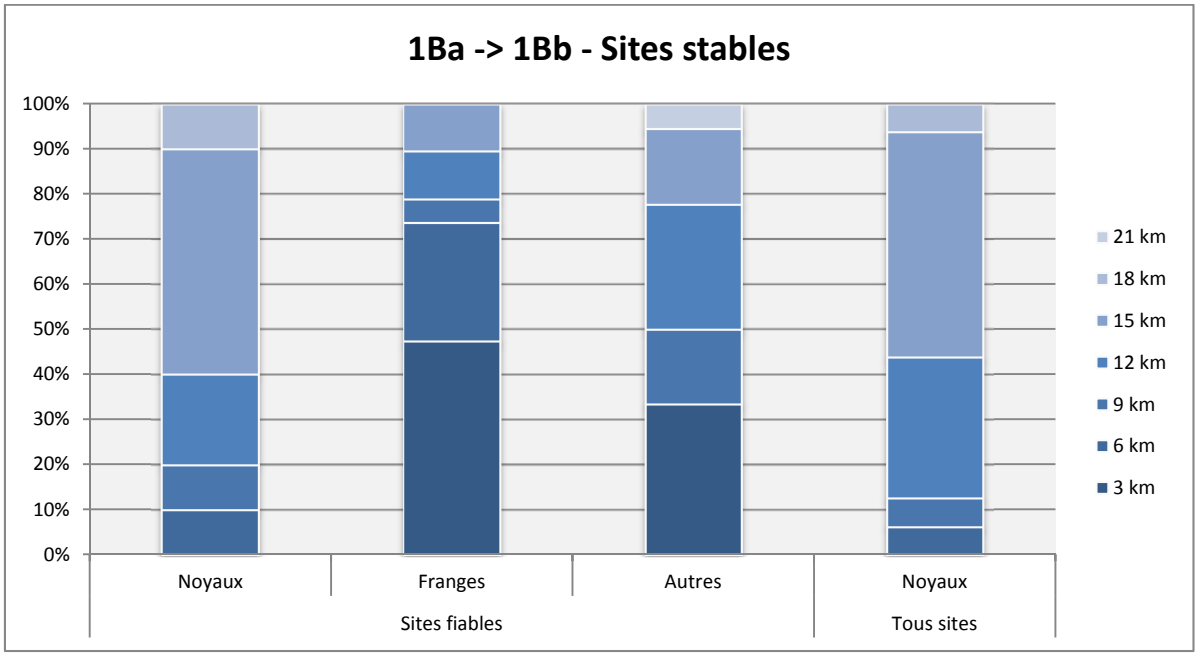


Figure 115 - Pourcentage du nombre de sites demeurant stables entre les *temps* 1Ba et 1Bb situés à des distances successives de 3 km des cours d'eau, pour chaque type d'occupation du sol et niveau de fiabilité.

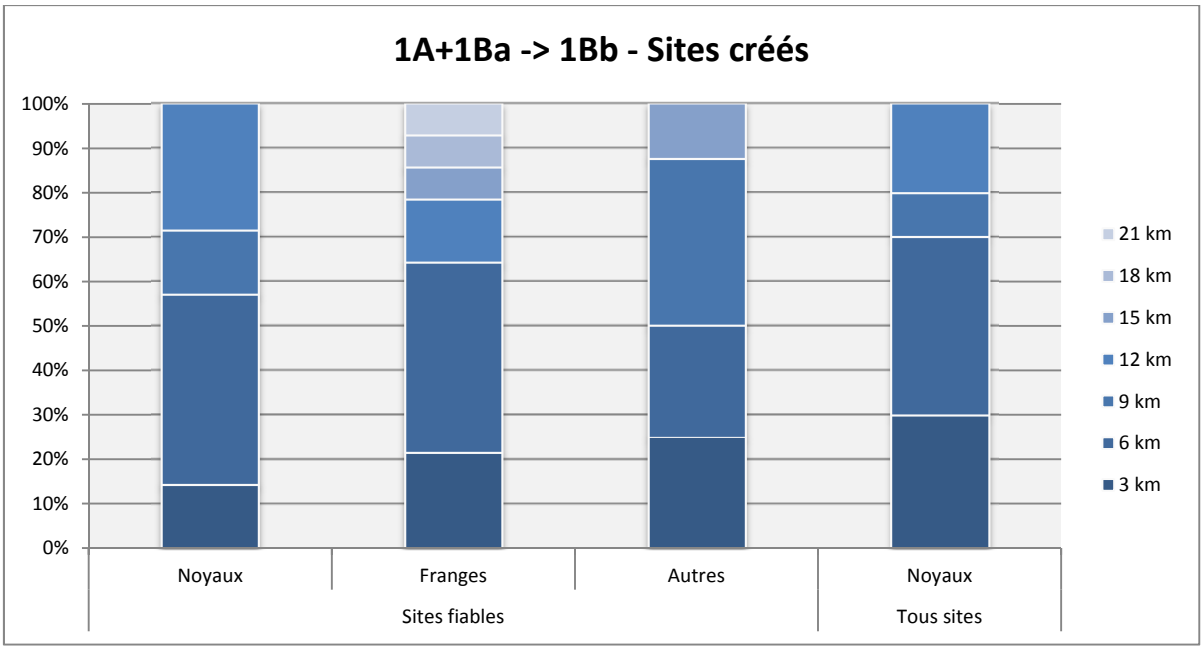


Figure 116 - Pourcentage du nombre de sites apparaissant entre les *temps* 1A+1Ba et 1Bb situés à des distances successives de 3 km des cours d'eau, pour chaque type d'occupation du sol et niveau de fiabilité.

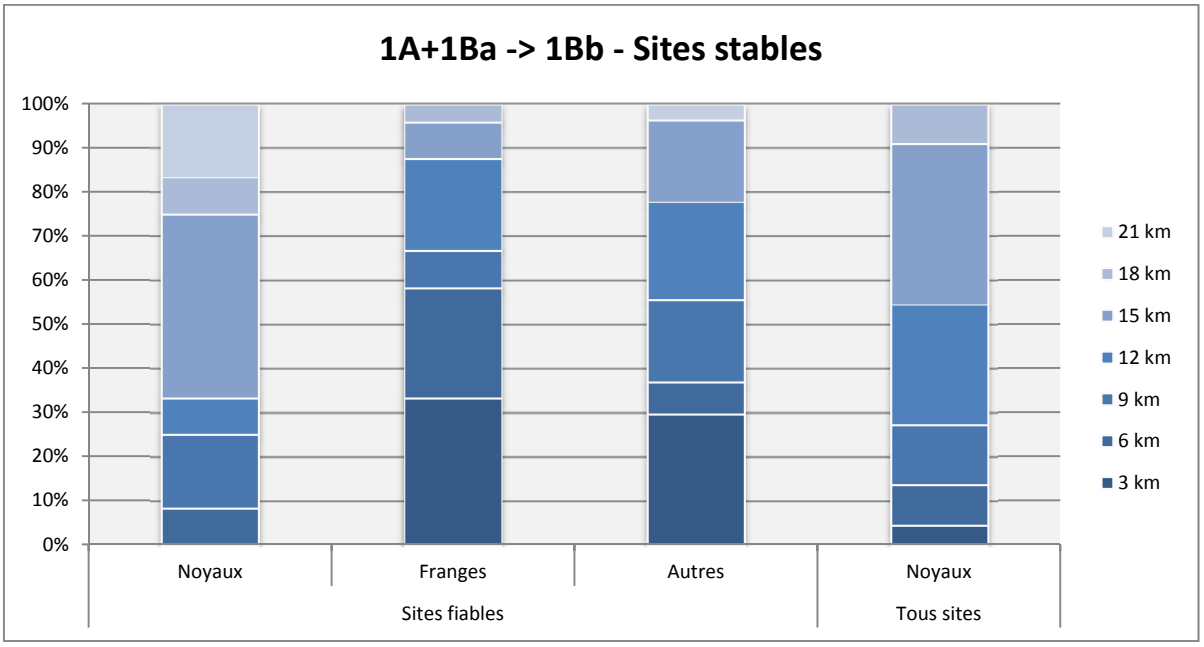


Figure 117 - Pourcentage du nombre de sites demeurant stables entre les *temps* 1A+1Ba et 1Bb situés à des distances successives de 3 km des cours d'eau, pour chaque type d'occupation du sol et niveau de fiabilité.

On constate que les sites qui apparaissent entre les *temps* 1Ba et 1Bb ne se localisent pas préférentiellement à proximité d'un cours d'eau. Il semble même que les sites qui perdurent entre les *temps* 1Ba et 1Bb ne soient pas les sites localisés au plus près d'un cours d'eau.

Le changement radical de tendance de localisation entre les *temps* 1Ba et 1Bb montre bien tout l'intérêt d'une distinction temporelle de ces logiques : il se pourrait en effet qu'un changement dans les besoins ou les priorités des populations ait également changé leur mode d'occupation du sol.

Les informations ci-dessus ont été à nouveau testées par le calcul du coefficient de corrélation entre la distance aux cours d'eau (3, 6, 9, 12…) et le nombre de sites associé à chaque intervalle (Tableau 24).

Tableau 24 - Coefficients de corrélation entre le nombre de sites correspondant à chaque type d'occupation et la distance aux cours d'eau.

1Ba - Coefficients de corrélation			
Sites fiables		Tous sites	
Hot-spots	*Outliers*	*Hot-spots*	*Outliers*
-0,72	-0,77	-0,74	-0,94
1Bb - Coefficients de corrélation			
Sites fiables		Tous sites	
Hot-spots	*Outliers*	*Hot-spots*	*Outliers*
-0,21	-0,92	-0,33	-0,98
1A+1Ba - Coefficients de corrélation			
Sites fiables		Tous sites	
Hot-spots	*Outliers*	*Hot-spots*	*Outliers*
-0,69	-0,89	-0,73	-0,98

Tous les coefficients de corrélation calculés sont négatifs : en effet, dans tous les cas, la distance aux cours d'eau et le nombre de sites associés évoluent en sens inverse. En d'autres termes, plus on s'éloigne d'un cours d'eau, moins on compte de sites. En outre, si toutes les configurations spatiales, présentent des coefficients de corrélation supérieurs à 70% quel que soit le niveau de fiabilité ou le niveau temporel considéré, les *hot-spots* associés au *temps* 1Bb présentent une corrélation très faible aux cours d'eau, alors que les *outliers* présentent des taux de corrélation très élevés.

Dans l'attente de réaliser des analyses destinées à comprendre ce changement d'occupation du sol et les différenciations internes au *temps* 1Bb entre *hot-spots* et *outliers*, nous avons été contrainte

d'écarter ce temps de l'analyse, et de n'envisager les possibilités de localisation des sites en fonction du paramètre « distance au cours d'eau » que pour les *temps* 1Ba et 1A+1Ba.

2.3 Test par des méthodes morphologiques

La distance au cours d'eau est ici envisagée sous une forme linéaire, par l'intermédiaire des buffers représentant le dilaté du réseau hydrographique à des pas successifs de 3 km. Nous souhaitions à présent tester la corrélation de ces paramètres du point de vue de leur forme.

En effet, la localisation préférentielle des sites à un certain niveau des cours d'eau (en amont ou en aval par exemple) pourrait être observée, et gommée par les buffers qui ne font que suivre leur linéaire.

Nous avons donc à nouveau mobilisé la morphologie mathématique et l'algorithme du graphe perceptuel (cf. Figure 48) afin de comparer le squelette des sites (fiables, puis en introduisant les sites non fiables) des *temps* 1Ba et 1A+1Ba au linéaire du réseau hydrographique (Figure 118 à Figure 121). Deux pas de squelettisation ont été testés et sont présentés : 3 km et 4 km (en d'autres termes, les sites ont été successivement dilatés par un élément structurant circulaire de 3 km et de 4 km de rayon).

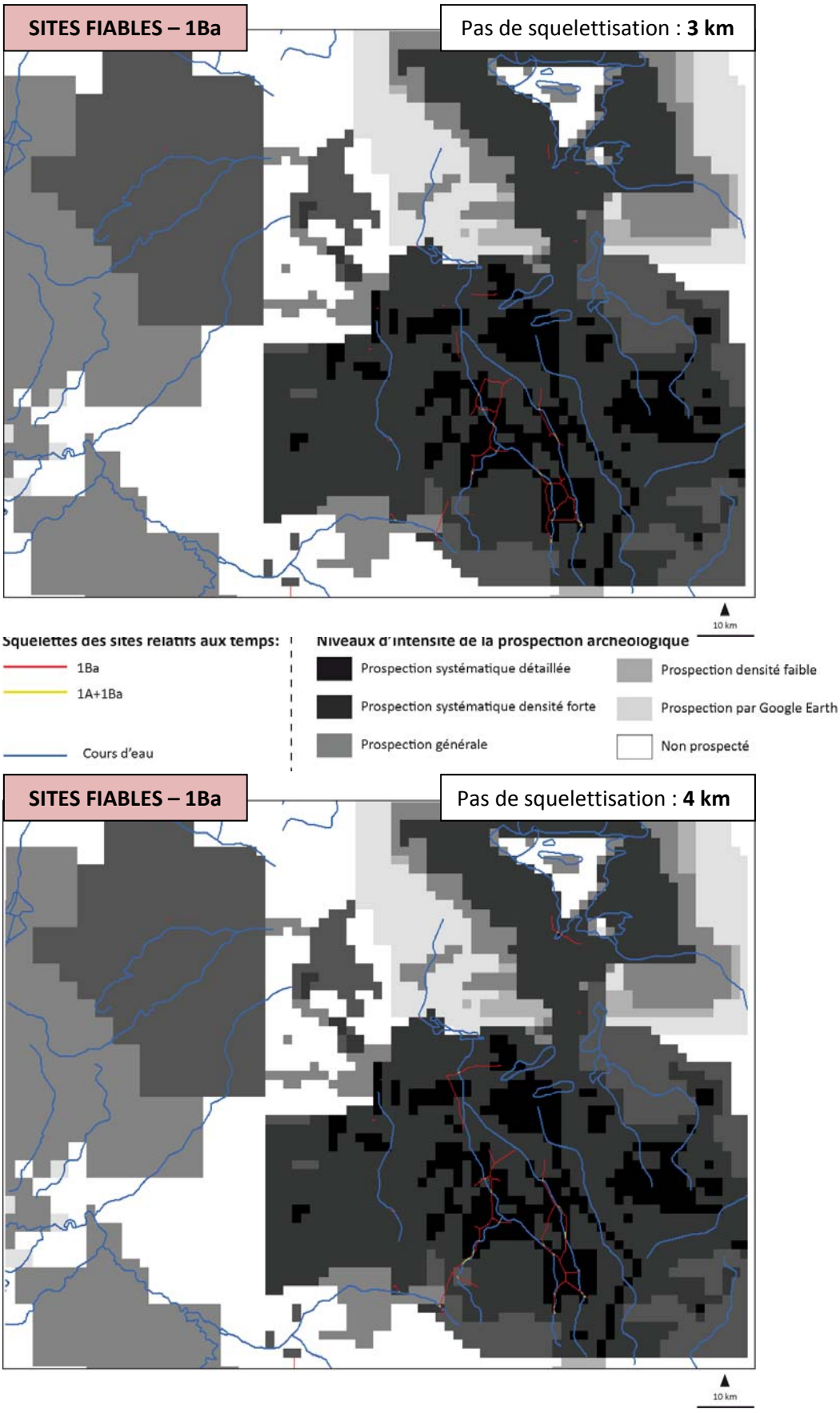


Figure 118 - Squelettes des sites fiables aux pas 3 km et 4 km, pour le *temps* 1Ba

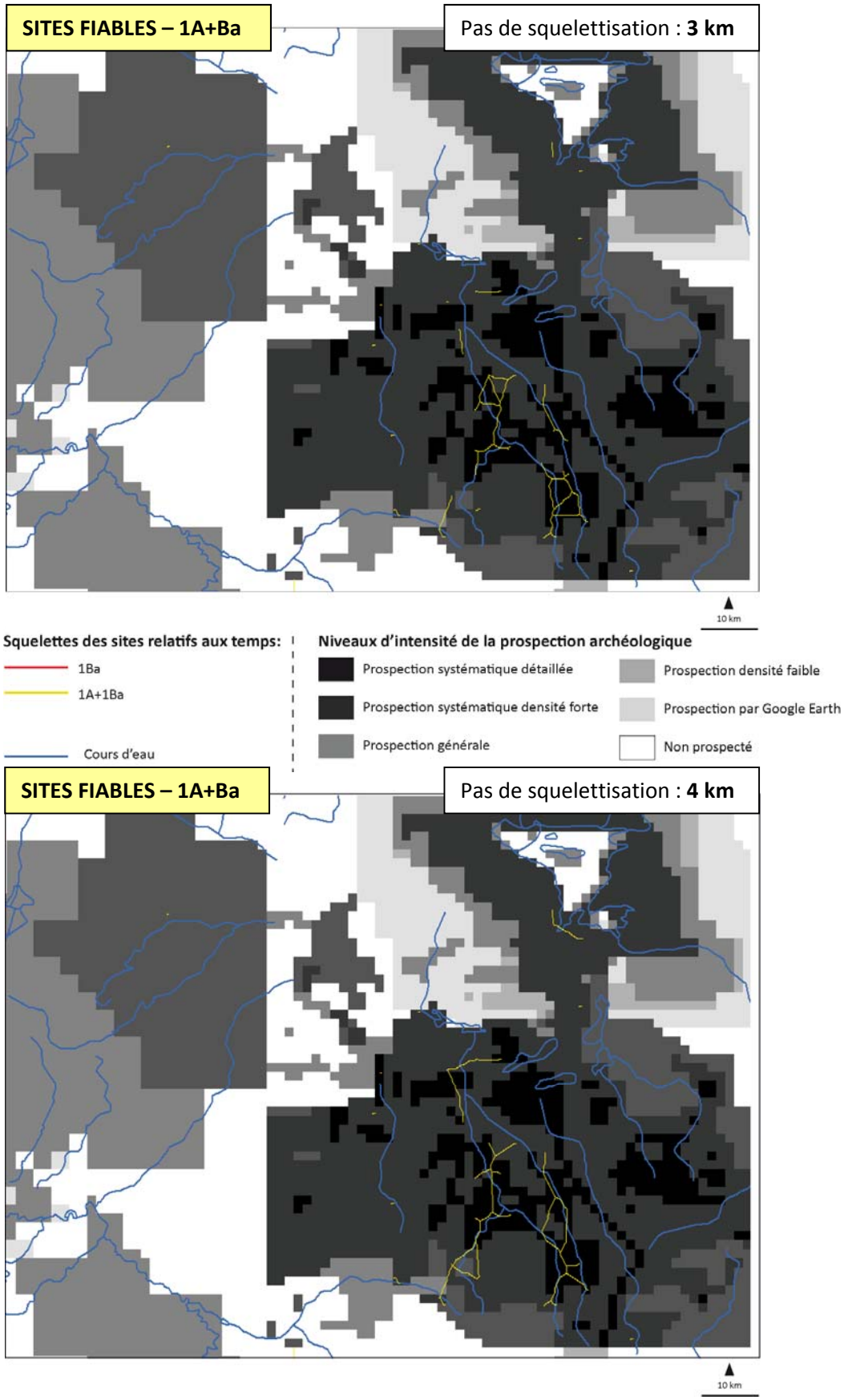


Figure 119 - Squelettes des sites fiables aux pas 3 km et 4 km, pour le *temps* 1A+1Ba

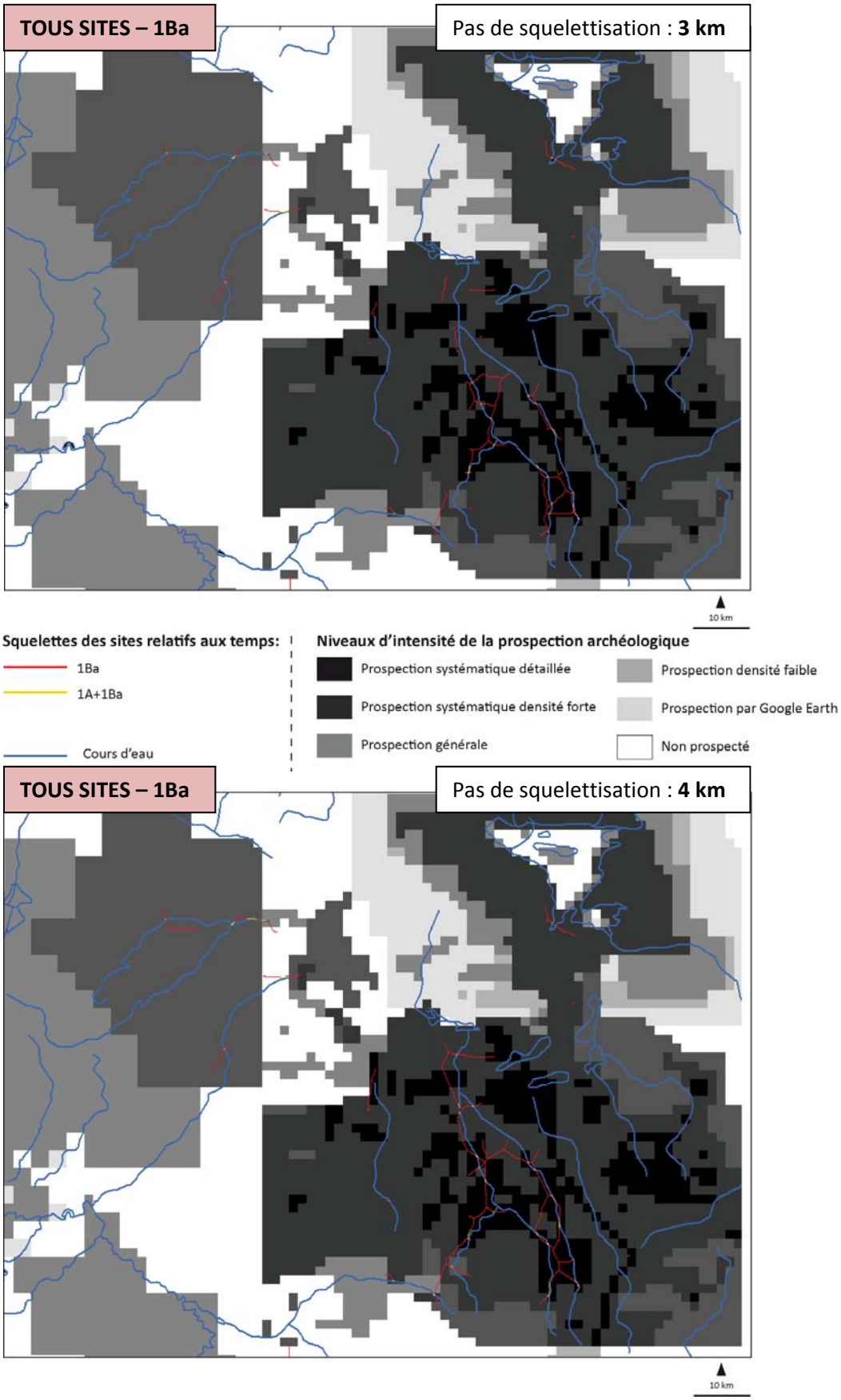


Figure 120 - Squelettes de la totalité des sites aux pas 3 km et 4 km, pour le *temps* 1Ba

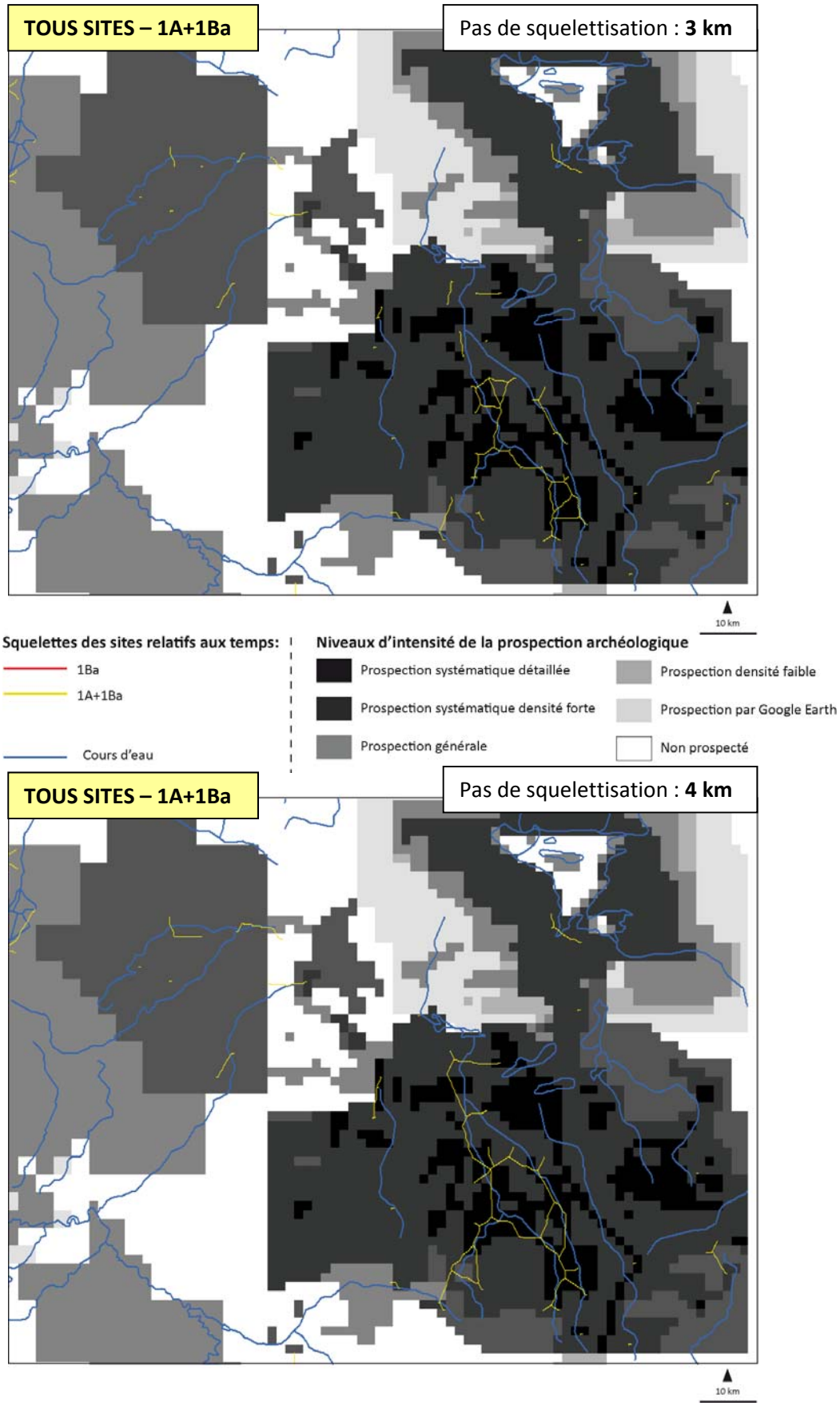


Figure 121 - Squelettes de la totalité des sites aux pas 3 km et 4 km, pour le *temps* 1A+Ba

On constate que quel que soit le pas, le niveau de fiabilité ou le temps considéré, le squelette des sites dans la zone la plus peuplée suit parfaitement le linéaire du cours d'eau. De manière générale, les sites sont répartis indifféremment sur toute sa longueur (dans les zones les mieux prospectées).

3. PASSAGE DE L'OBSERVATION A L'ESTIMATION DE L'OCCUPATION DU SOL DANS UNE LOGIQUE POSSIBILISTE

3.1 Définition du cadre des sous-ensembles flous de type 1

L'objectif final étant d'obtenir des cartes représentant les possibilités de localisation des sites en fonction de la présence ou non d'un cours d'eau, la méthode adoptée consiste à présent à calibrer les sous-ensembles flous correspondant à un nombre de sites « fort », « moyen » ou « faible » (c'est-à-dire, à terme, des possibilités « forte », « moyenne » ou « faible » de localisation de sites) à partir du nombres de sites relevés précédemment pour chaque distance au cours d'eau.

Cependant, dans un but de reproductibilité de la méthode, et de comparabilité des résultats, la définition des sous-ensembles flous « fort », « moyen » et « faible » doit s'effectuer de manière identique pour chaque temps, niveau de fiabilité, et configuration spatiale envisagée.

La méthode élaborée est la suivante : les bornes de chaque sous-ensemble flou, seront définies par le pourcentage que représente le nombre de sites à chaque distance du cours d'eau par rapport à la moyenne des sites pour chaque temps, niveau de fiabilité et type de configuration spatiale.

Le cadre général auquel sera appliqué chaque cas est présenté sur la Figure 122 : Les couleurs rouge, bleue et verte correspondent aux valeurs faibles, moyennes et fortes. Les deux zones colorées en orange et en jaune correspondent aux zones d'incertitude où on ne peut avec certitude définir si le nombre est « faible » ou « moyen », ou « élevé » ou « moyen ».

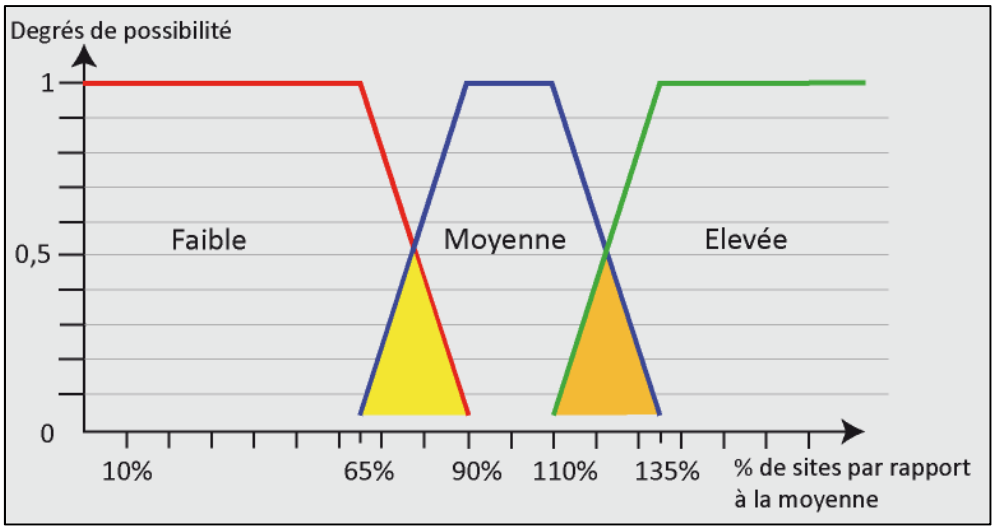


Figure 122 - Définition du cadre des sous-ensembles flous permettant d'évaluer si la quantité de sites est "faible", "moyenne" ou "élevée" par rapport à la moyenne.

Ainsi, afin d'estimer si le nombre de sites à chaque pas de dilatation du cours d'eau est plutôt « fort », « moyen » ou « faible », on calcule le pourcentage que représente chaque nombre de sites présents dans chaque dilaté par rapport à la moyenne.

Si le nombre de sites est noté N, on calcule donc N * 100 / *moyenne*.

Le Tableau 25 montre en exemple cette étape des calculs réalisés pour les sites fiables du *temps* 1Ba.

Tableau 25 - Calcul du pourcentage de sites par rapport à la moyenne : l'exemple des sites fiables du *temps* 1Ba

1Ba – sites fiables		
Distance aux cours d'eau	**Nombre de sites *hot-spots***	**Nombre de sites *outliers***
3 km	34	12
6 km	5	3
9 km	3	2
12 km	3	0
15 km	3	2
18 km	1	0
Moyenne	***8***	***4***

1Ba – sites fiables		
Distance aux cours d'eau	**Pourcentage de sites *hot-spots* par rapport à la moyenne**	**Pourcentage de sites *outliers* par rapport à la moyenne**
3 km	416%	316%
6 km	61%	79%
9 km	37%	53%
12 km	37%	0
15 km	37%	53%
18 km	12%	0

A partir des nombres de sites à chaque distance des cours d'eau pour chaque temps et niveau de fiabilité, on définit les sous-ensembles flous correspondant au « fort », « moyen » ou « faible » nombre de sites par rapport à la moyenne.

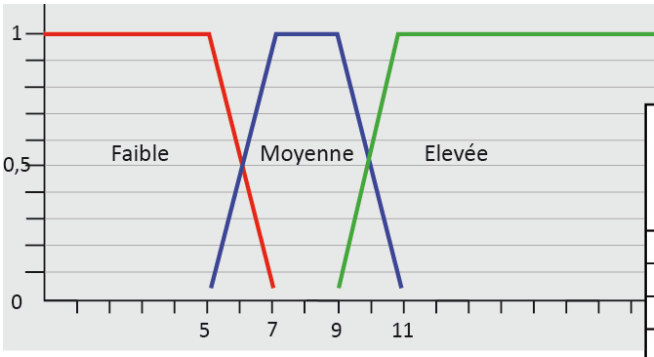
Cette procédure est décrite à titre d'exemple dans le Tableau 26 pour les sites fiables du *temps* 1Ba.

Tableau 26 - Calcul des sous-ensembles flous à partir des sites fiables du *temps* 1Ba pour chaque type d'occupation.

Limites des sous-ensembles flous	***Hot-spots***	***Outliers***
65%	5 (*moyenne*65/100, soit 8*65/100*)	2,6
90%	7	3,6
100% (moyenne)	8	4
110%	9	4,4
135%	11	5,4

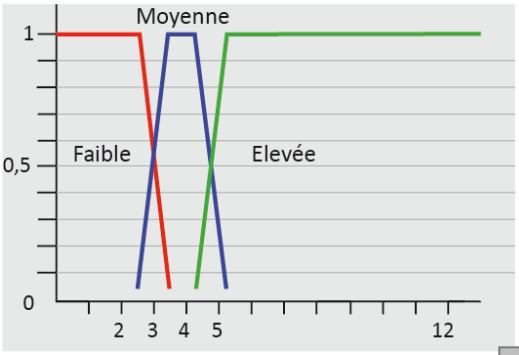
On peut ainsi, à partir de ce tableau, tracer les sous-ensembles flous qui permettront d'évaluer les possibilités pour que le nombre de sites présent à chaque distance des cours d'eau et inhérent à chaque temps, niveau de fiabilité et type de configuration spatiale soit « fort », « moyen », ou « faible » (Figure 123).

1Ba , sites fiables - *Hot-spots* - Sous-ensembles flous de type 1



distance au cours d'eau	Possibilité de sites		Possibilité en %
3 km	Elevée	1	100
6 km	Faible	1	100
9 km	Faible	1	100
12 km	Faible	1	100
15 km	Faible	1	100
18 km	Faible	1	100

1Ba , sites fiables - *Outliers* - Sous-ensembles flous de type 1



distance au cours d'eau	Possibilité de sites		Possibilité en %
3 km	Elevée	1	100
6 km	Faible	0,5	50
	Moyenne	0,5	50
9 km	Faible	1	100
12 km	0	0	0
15 km	Faible	1	100

1Ba – sites fiables		
Distance aux cours d'eau	**Nombre de sites *hot-spots***	**Nombre de sites *outliers***
3 km	34	12
6 km	5	3
9 km	3	2
12 km	3	0
15 km	3	2
18 km	1	0
21 km	0	0
Distance aux cours d'eau	**Possibilité d'occupation du sol de type *hot-spot***	**Possibilité d'occupation du sol de type *outliers***
3 km	Elevée	Elevée
6 km	Faible	Faible (0,4) Moyenne (0,6)
9 km	Faible	Faible
12 km	Faible	Faible
15 km	Faible	Faible
18 km	Faible	Faible
21 km	Faible	Faible

Figure 123 - Sous-ensembles flous calculés à partir des sites fiables du *temps* 1Ba pour chaque type d'occupation.

3.2 Définition du cadre des sous-ensembles flous de type 2

Le *flou* mobilisé jusqu'à présent est défini comme du « flou de type 1 » : les fonctions d'appartenance des sous-ensembles flous sont en effet des valeurs précises. On peut noter sur la Figure 123, pour les sites *hot-spot* par exemple, qu'une coupe à 6 sites correspond à un niveau de possibilité faible à 0,5 et moyenne à 0,5 également : ces deux valeurs sont bien des valeurs précises.

On pourrait objecter à ce constat qu'il est paradoxal qu'une méthode dite *floue* déduise une valeur d'appartenance parfaitement précise, comme c'est le cas dans le *flou de type 1* (Mendel, 2004 ; Mendel, John, 2002 ; Fisher, Arnot, 2006). L'introduction du *flou de type 2* (Zadeh, 1978) permet de s'affranchir de cet écueil. En effet, cette logique permet de considérer à la fois le *flou* sur les valeurs de références et le flou des valeurs d'appartenance, qui ne sont désormais plus définies par des valeurs précises mais par des intervalles (Figure 124). Dans le *flou de type 2,* on parle alors d'empreinte de l'incertitude (« *footprint of uncertainty* »).

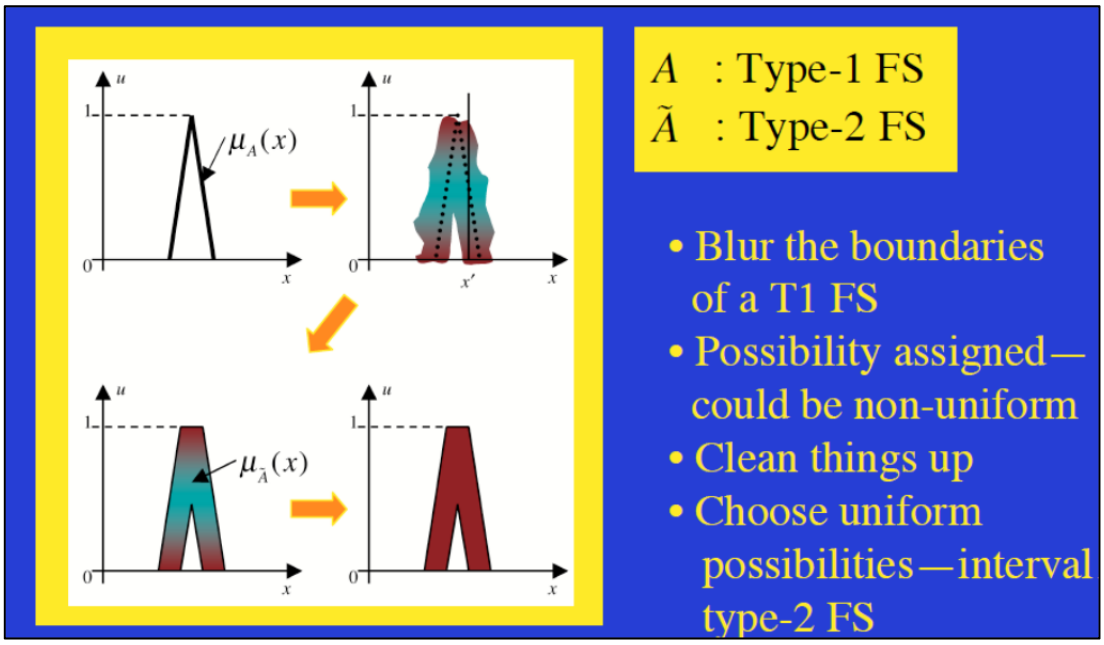


Figure 124 - Le passage du *flou de type 1* au *flou de type 2* (Mendel, 2004).

Ainsi, « Type-2 fuzzy sets can be seen as a response to the philosophical issue of higher order vagueness. It is shown that the type 2 analysis yields a variety of answers to any query about the amount of change, reflecting the higher order vagueness in the uncertainty if the change in a vague phenomenon" (Fisher, Arnot, 2006). Nous postulons que le cadre du *flou de type 2* est particulièrement approprié aux questionnements archéologiques.

Dans notre cas, cela suppose de transformer les valeurs uniques des bornes des sous-ensembles définis précédemment en intervalles. Plutôt que de définir ces intervalles de façon arbitraire, ce qui serait contraire à la démarche empirique adoptée jusqu'à présent et ne serait porteur que d'une complexification inutile et alourdissant la démarche sans véritable apport dans la compréhension et l'analyse, nous avons choisi de définir les intervalles en nous basant sur la différenciation établie dans la fiabilité des sites. La Figure 125 explique la procédure suivie pour l'élaboration des *sous-ensembles flous de type 2*.

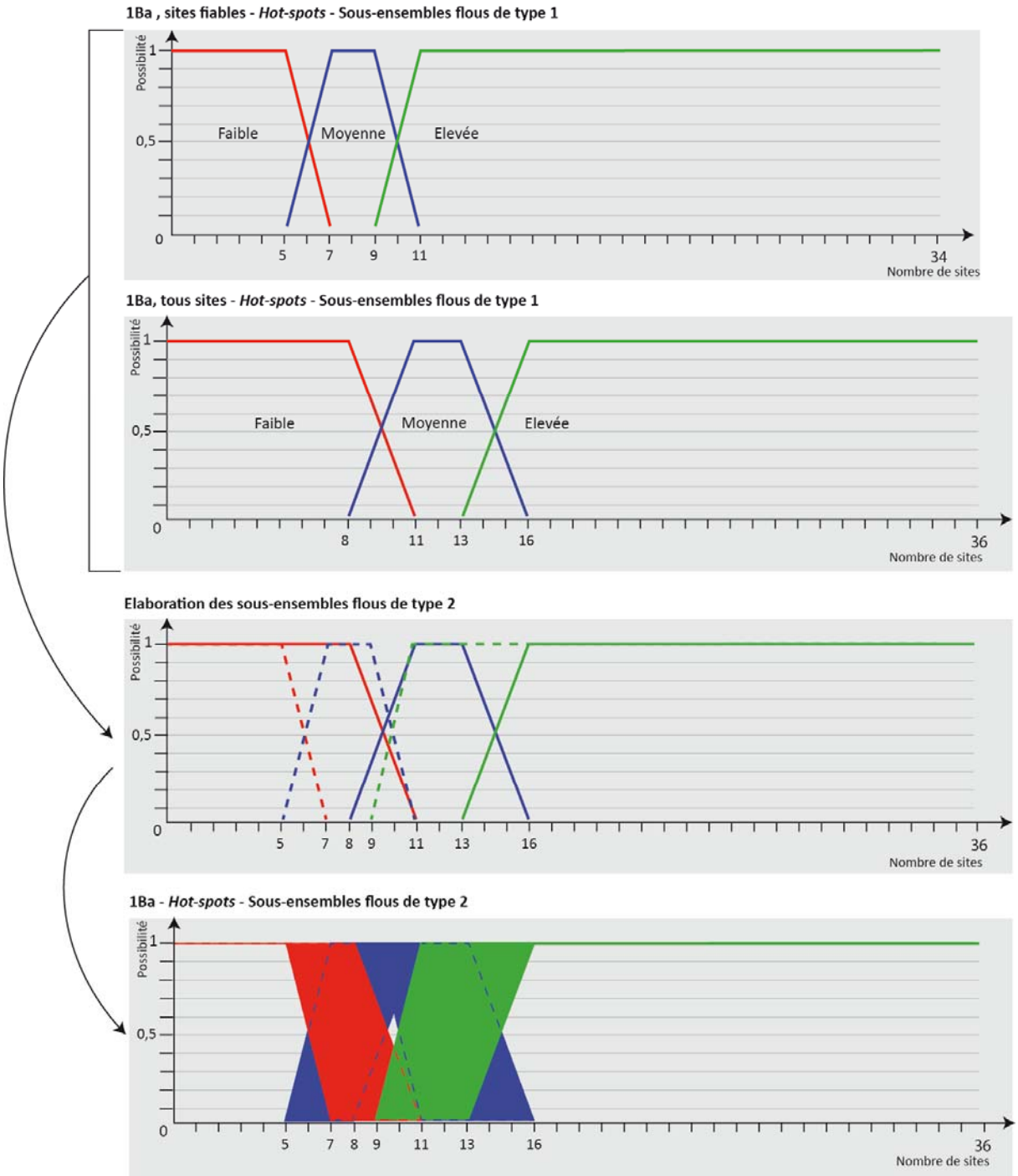


Figure 125 - Passage des sous-ensembles flous de type 1 aux sous-ensembles flous de type 2.

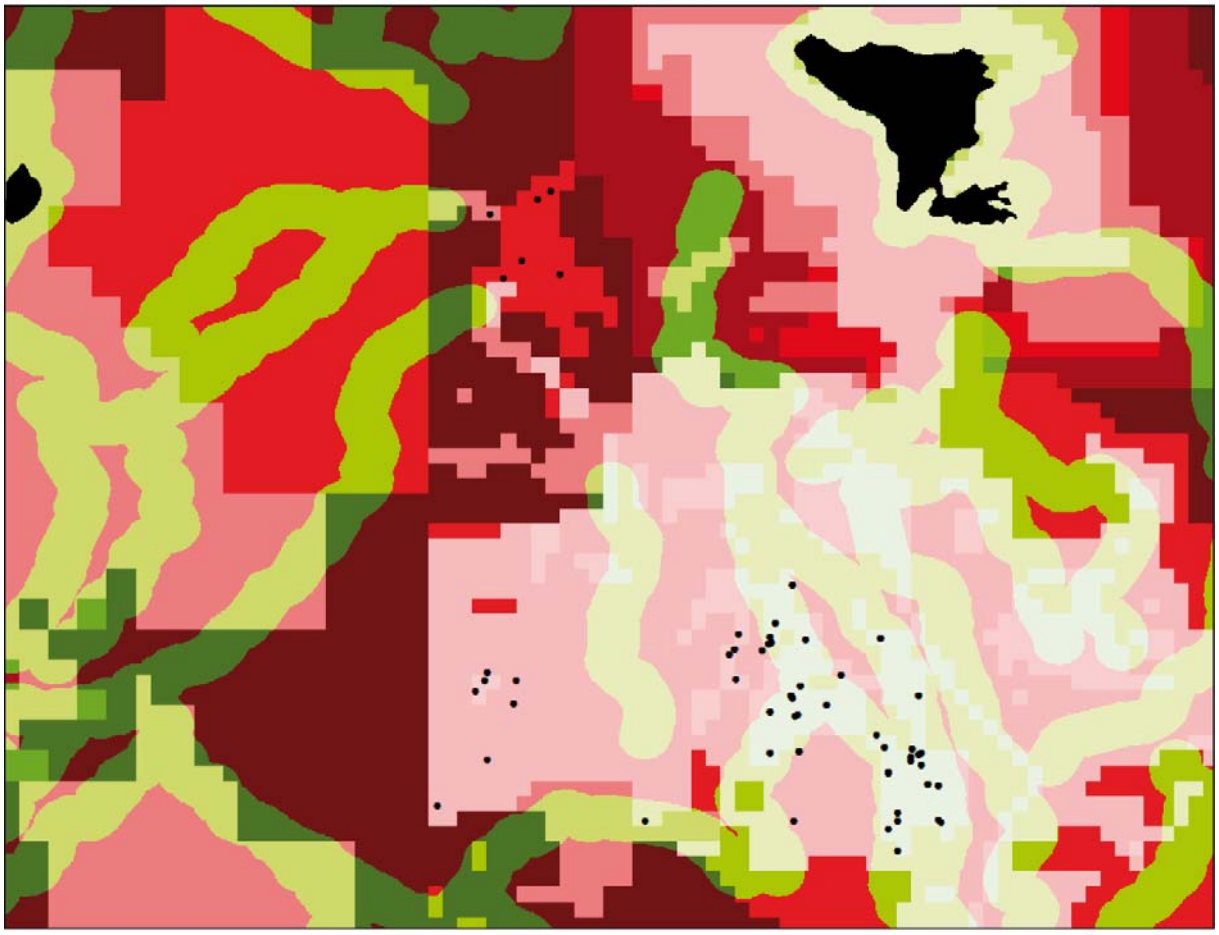
Le *sous-ensemble flou de type 2* n'est donc plus une ligne mais une surface : l'incertitude présente une empreinte dont les limites sont définies par la prise en compte des limites des *sous-ensembles flous de type 1* pour les sites fiables (limite inférieure du *sous-ensemble flou de type 2*) des limites des *sous-ensembles flous de type 1* pour la totalité des sites (limite supérieure du *sous-ensemble flou de type 2*).

Les *sous-ensembles flous de type 2* ainsi définis présentent l'avantage de synthétiser dans une même évaluation des possibilités de localisation des sites l'information relative à la fiabilité des sites.

3.1 Cartographie des résultats

Les cartes produites à partir des sous-ensembles flous définis sur la Figure 125 sont présentées sur les Figure 126 à Figure 128 pour les sites *hot-spots* du *temps* 1Ba, et sur les Figure 129 à Figure 131 pour les sites *outliers* du *temps* 1Ba. Les cartes relatives au temps 1A+1Ba sont présentées dans l'Annexe 2.

1Ba , sites fiables - *Hot-spots* - Sous-ensembles flous de type 1



distance au cours d'eau	Possibilité de sites		Possibilité en %
3 km	Elevée	1	100
6 km	Faible	1	100
9 km	Faible	1	100
12 km	Faible	1	100
15 km	Faible	1	100
18 km	Faible	1	100

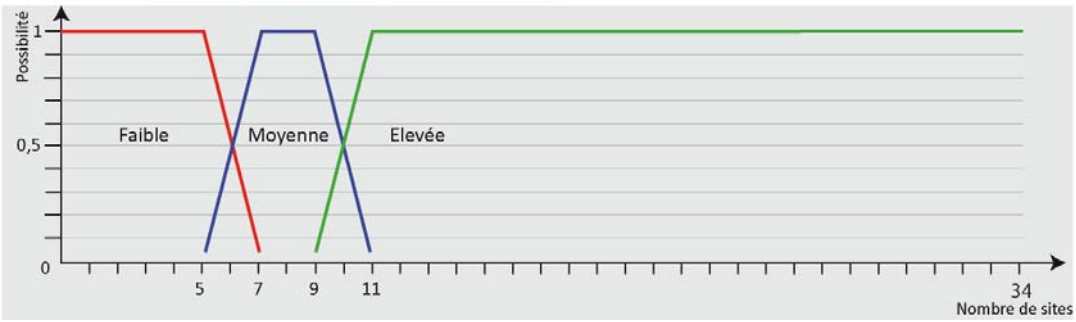
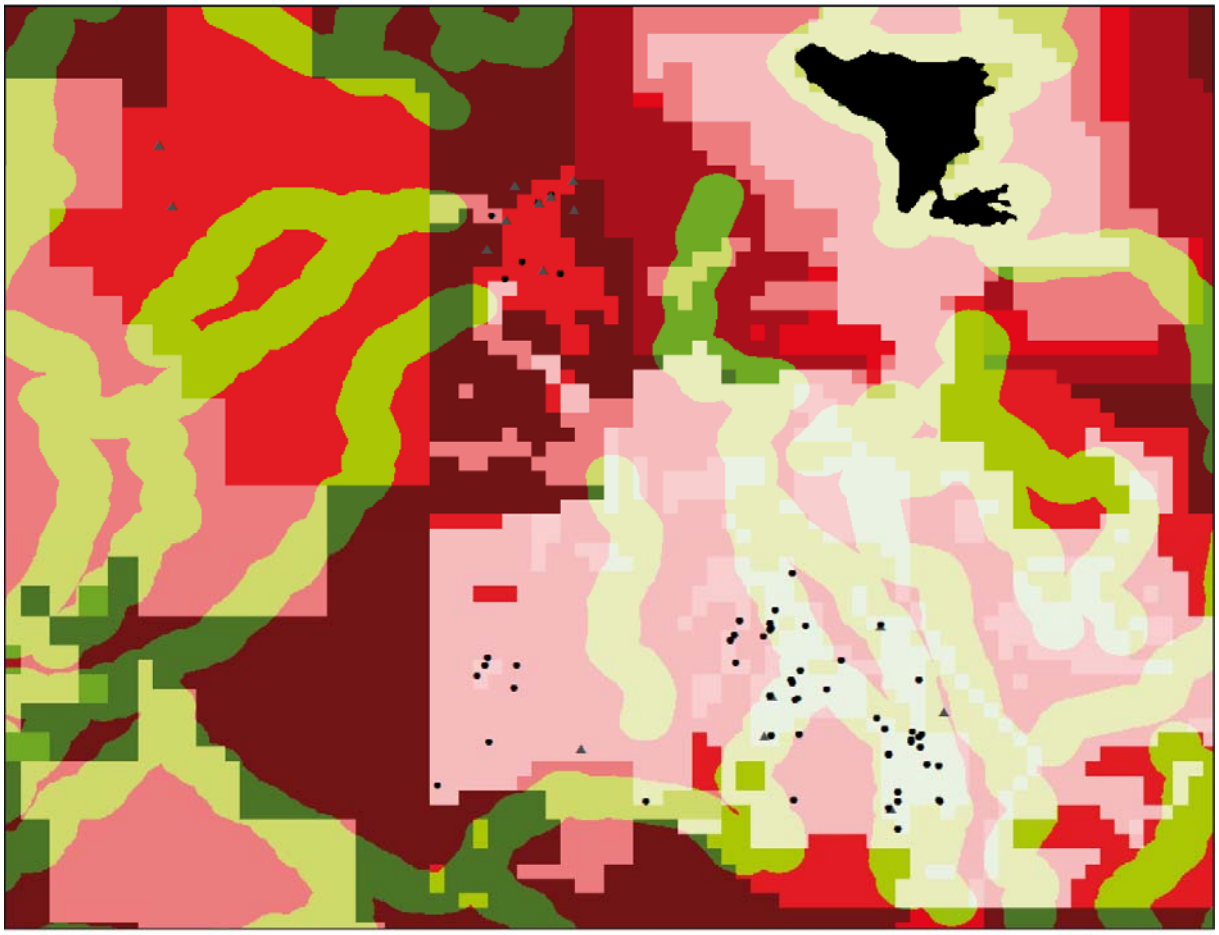


Figure 126 - Possibilités de localisation des sites évaluées à partir des *sous-ensembles flous de type 1* des sites *hot-spot* fiables du *temps* 1Ba.

1Ba, tous sites - *Hotspots* - Sous-ensembles flous de type 1



distance au cours d'eau	Possibilité de sites		Possibilité en %
3 km	Elevée	1	100
6 km	Faible	1	100
9 km	Faible	1	100
12 km	Faible	1	100
15 km	Faible	1	100
18 km	Faible	1	100

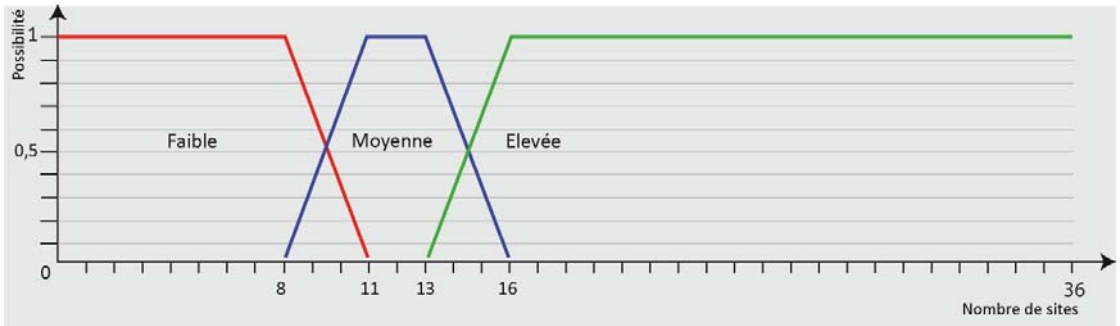
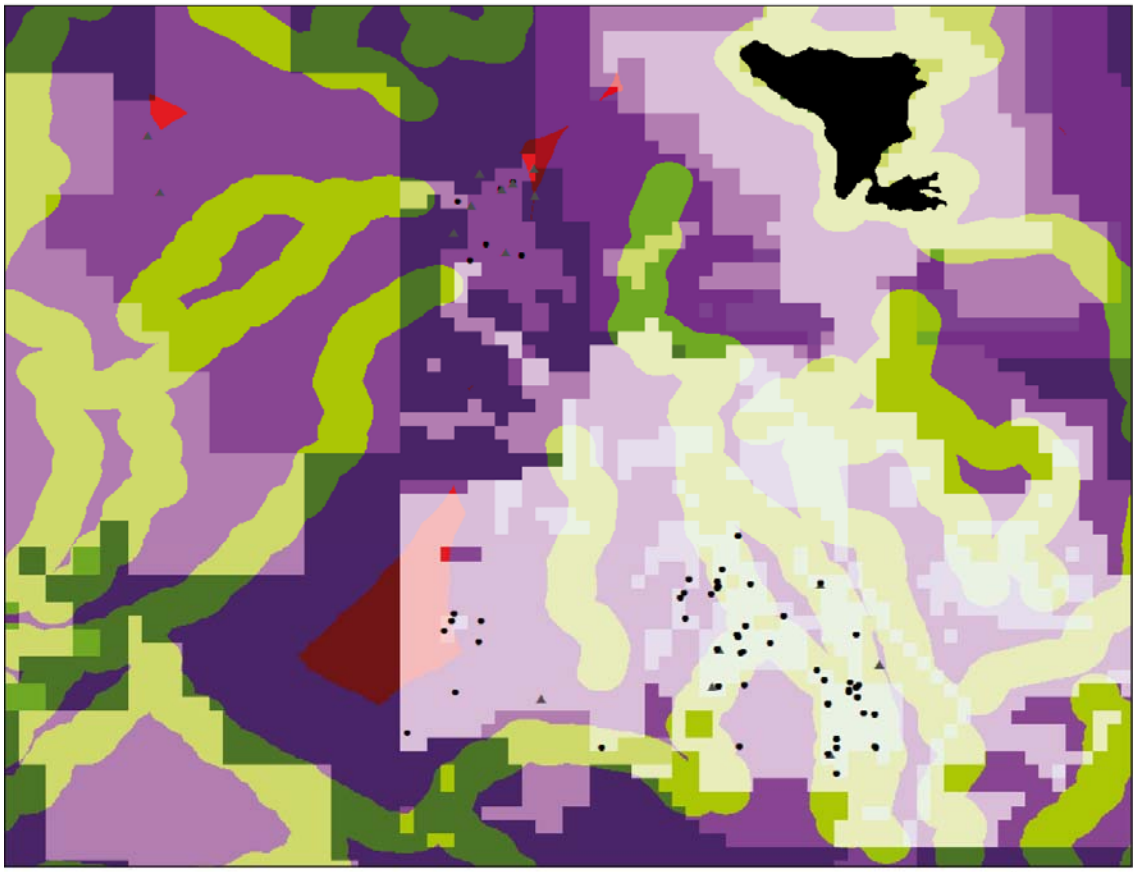


Figure 127 - Possibilités de localisation des sites évaluées à partir des *sous-ensembles flous de type 1* de la totalité des sites *hot-spot* du *temps* 1Ba.

1Ba - *Hot-spots* - Sous-ensembles flous de type 2



● Sites fiables

▲ Sites non fiables

▲ 10 km

distance au cours d'eau	Possibilité de sites	
3 km	Elevée	1
6 km	Faible	1
	Moyenne	1
9 km	Faible	1
	Moyenne	1
12 km	Faible	1
	Moyenne	1
15 km	Faible	1
	Moyenne	1
18 km	Faible	1

Intensité de prospection de la zone

0 1 2 3 4 5

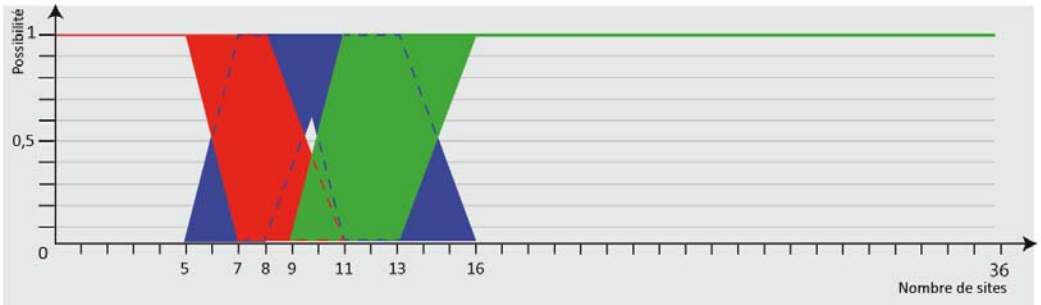
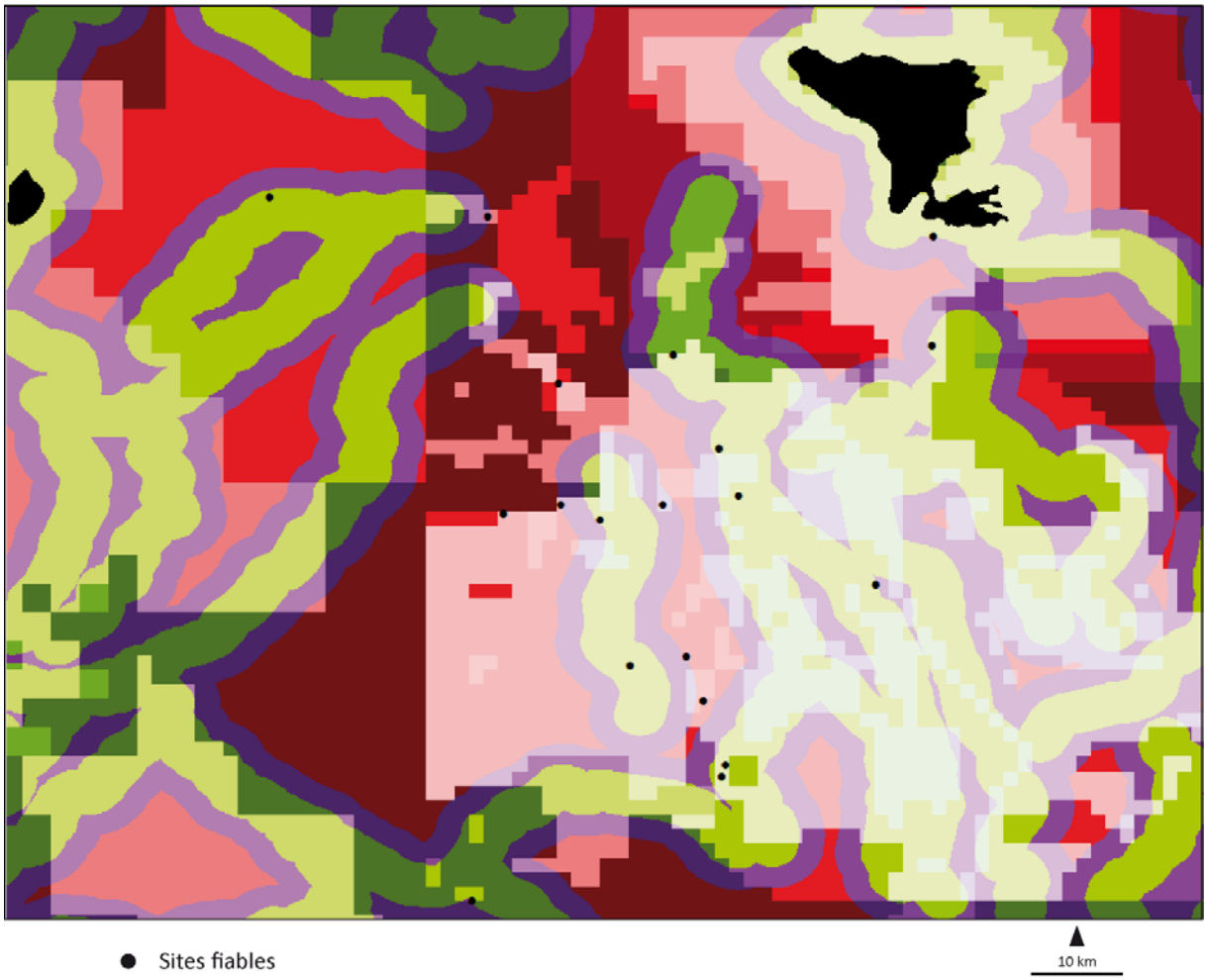


Figure 128 - Possibilités de localisation des sites évaluées à partir des *sous-ensembles flous de type 2* des sites *hot-spot* du *temps* 1Ba.

1Ba, sites fiables - *Outliers* - Sous-ensembles flous de type 1



distance au cours d'eau	Possibilité de sites		Possibilité en %
3 km	Elevée	1	100
6 km	Faible	0,5	50
	Moyenne	0,5	50
9 km	Faible	1	100
12 km	0	0	0
15 km	Faible	1	100

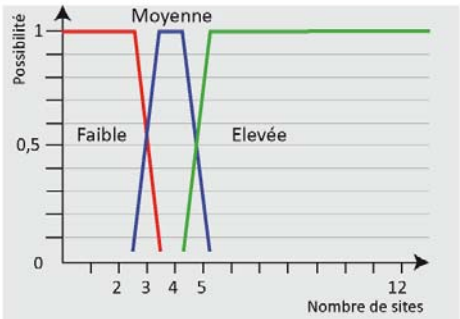
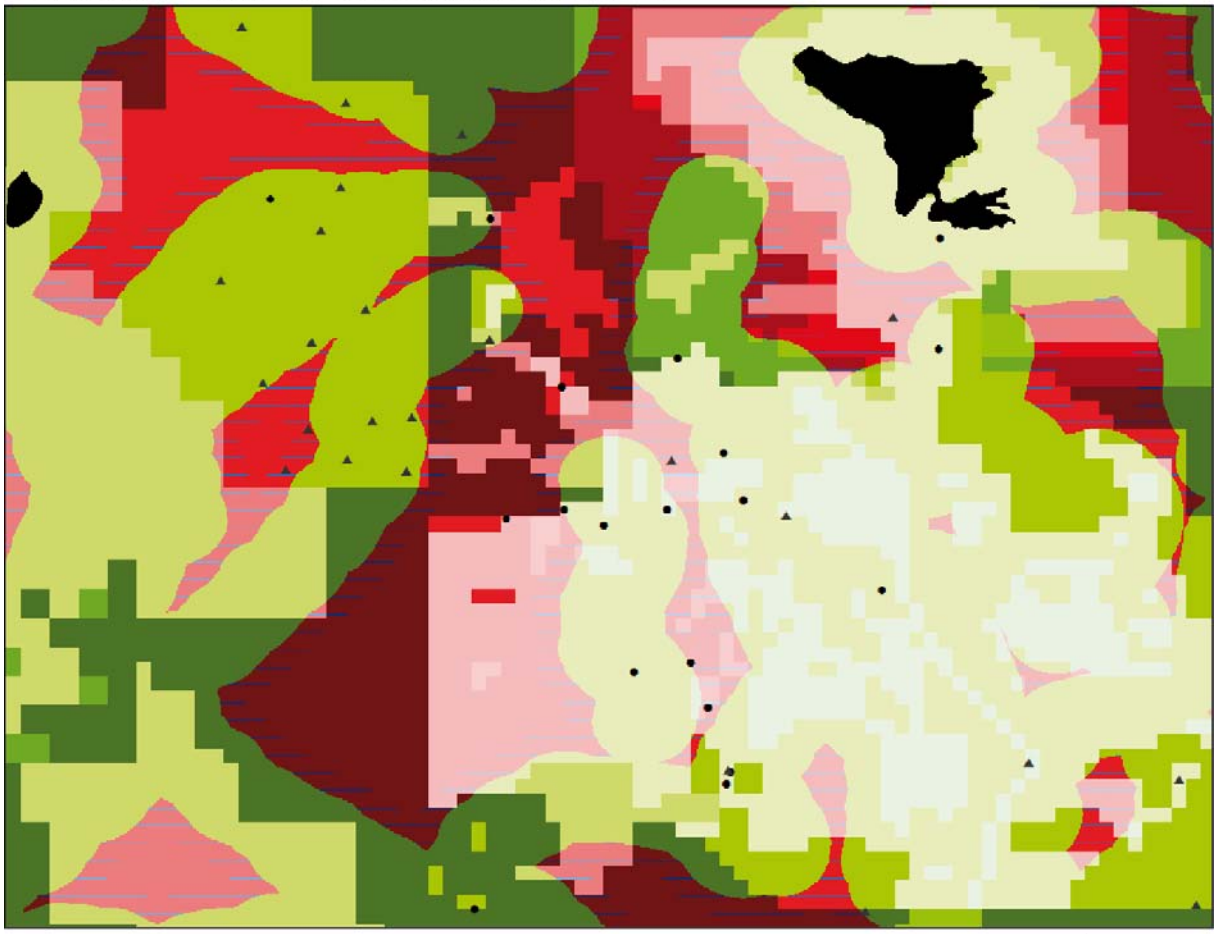


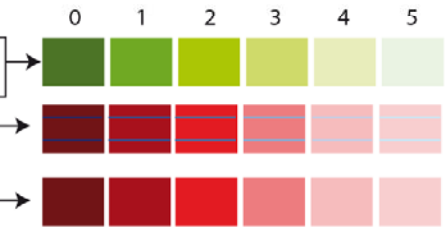
Figure 129 - Possibilités de localisation des sites évaluées à partir des *sous-ensembles flous de type 1* des sites *outliers* fiables du *temps* 1Ba.

1Ba, tous sites - *Outliers* - Sous-ensembles flous de type 1



distance au cours d'eau	Possibilité de sites		Possibilité en %
3 km	Elevée	1	100
6 km	Elevée	1	100
9 km	Faible	0,8	80
	Moyenne	0,2	20
12 km	0	0	0
15 km	Faible	1	100

Intensité de prospection de la zone



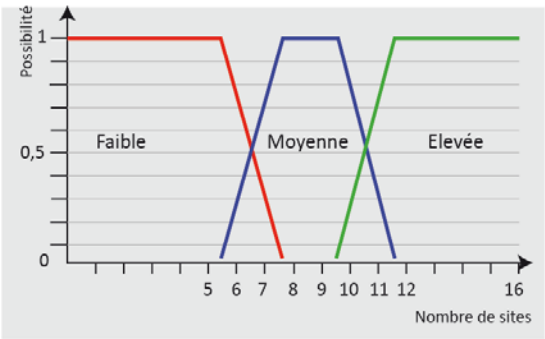


Figure 130 - Possibilités de localisation des sites évaluées à partir des *sous-ensembles flous de type 1* de la totalité des sites *outliers* du *temps* 1Ba.

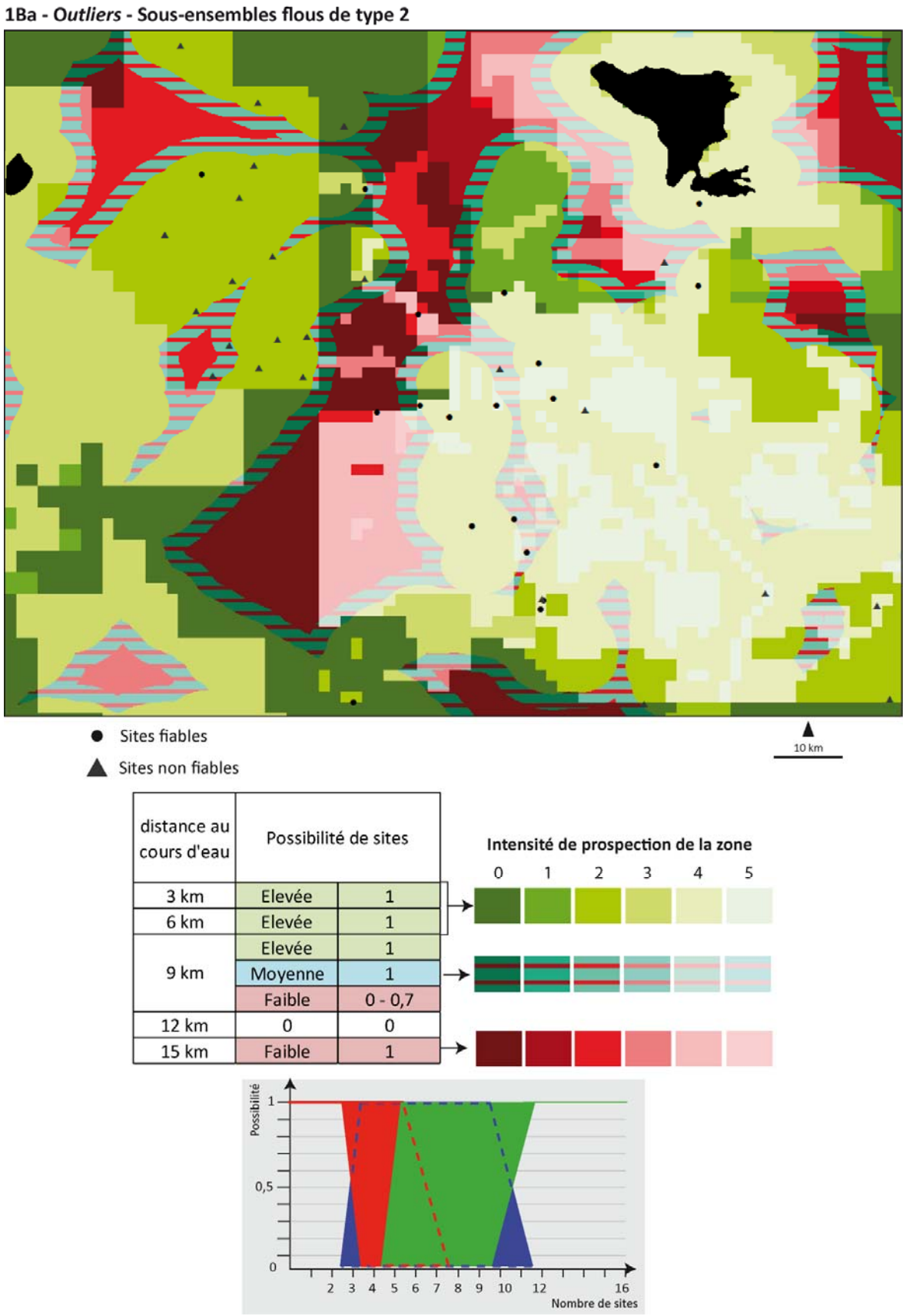


Figure 131 - Possibilités de localisation des sites évaluées à partir des *sous-ensembles flous de type 2* des sites *outliers* du *temps* 1Ba.

Nous avons choisi de distinguer, dans la cartographie des résultats, les possibilités définies par les *sous-ensembles flous de type 1* et *2*, et la manière dont ceux-ci se déclinent spatialement en fonction des zones d'intensité de la prospection.

En effet, plus une zone a été prospectée, plus une zone « vide de sites » a des chances de traduire l'absence de peuplement plus qu'une absence de connaissance sur la zone. Moins la zone a été prospectée, plus une zone vide pourrait être susceptible de receler des sites… ce qui ne signifie pas pour autant que la présence de sites soit possible aussi intensément sur l'ensemble des zones non prospectées (c'est pour définir la variabilité de cette possibilité sur l'ensemble de la zone d'étude que les sous-ensembles flous ont été élaborés).

Afin de traduire ces deux informations (possibilités de localisation des sites évaluées sur le paramètre « distance aux cours d'eau », et intensité de la prospection) sur une même cartographie des résultats, nous avons choisi de décliner les possibilités « forte » (couleur verte), « moyenne » (couleur bleue) et « faible » (couleur rouge) dans des gammes d'intensité décroissant en fonction du niveau d'intensité de prospection de la zone concernée.

Par exemple, une zone non prospectée (intensité 0 de prospection) où la possibilité de localisation de sites serait évaluée comme « forte » se verrait attribuer la couleur vert foncé.

Une zone où la possibilité de sites serait toujours évaluée comme forte, mais qui a été très bien prospectée (intensité de la prospection 5) se verrait quant à elle attribuée la couleur vert clair. Ce dernier cas nous donne ainsi un autre type d'information, permettant de discuter à la fois la pertinence des cartes de possibilité, et les caractéristiques du peuplement : conserver les zones prospectées dans la cartographie des résultats permet de constater directement dans quelle mesure les sites correspondent spatialement au modèle de possibilités réalisé, et d'observer où se situent les écarts au modèle.

La densité de l'information représentée sur ces cartes peut néanmoins rendre la lecture difficile si l'on tente de tout regarder en même temps. Afin de faciliter la compréhension des résultats présentés, nous pourrions globalement les synthétiser ainsi, avec en entrée l'information que l'on souhaite en extraire :

- Si nous souhaitons porter attention à la dimension « possibiliste » des cartes, il convient de se focaliser sur les couleurs foncées (zones non prospectées, et dont le peuplement possible est recherché).

- Si notre intérêt est plutôt « descriptif », il convient plutôt de porter attention aux couleurs plus claires (zones bien prospectées, et sur lesquelles repose l'élaboration du modèle).

CONCLUSION : DISCUSSION SUR LA METHODE ET LES RESULTATS

Cartographier l'ensemble de la zone étudiée (et pas uniquement les zones non prospectées, c'est-à-dire les zones à investiguer) présente ainsi l'avantage de donner à l'observateur deux informations simultanées - pourvu qu'on replace les sites connus sur la carte :

- Les possibilités de localisation des sites dans les zones non prospectées ;
- La localisation des zones et des sites qui correspondent au modèle réalisé, et la localisation de ceux qui s'en écartent : ces informations nous sont extrêmement précieuses, car ce sont elles qui vont nous indiquer dans quelle mesure il serait nécessaire d'affiner ou de rectifier le modèle élaboré, tout en s'intéressant de plus près aux sites qui s'en écartent, et de se demander si ceux-ci relèvent d'un type de configuration spatiale ou d'un mode d'utilisation du sol différent, par exemple. C'est d'ailleurs la démarche suggérée par Hans Kamermans (2006): "These extrapolation models are most commonly used in archaeological heritage management archaeology, but may also have their use in scientific research, for example to analyze anomalies in an observed pattern".

En outre, ces cartes montrent bien, selon nous, l'intérêt et l'importance de l'intégration de multiples niveaux d'analyse dans l'évaluation des « passés possibles » :

- Niveaux temporels : que l'on se base sur des critères théoriques ou empiriques, les informations modélisées sont toujours censées représenter les modes d'occupation du sol des populations concernées, traduits en termes de besoins, de priorités, d'accessibilité, etc… Construire des modèles généraux et statiques va donc totalement à l'encontre de la variabilité des populations et de leurs dynamiques de changement. L'évolution temporelle des résultats de la corrélation entre la distance aux cours d'eau et le nombre de sites illustre clairement ce propos. Ainsi, un modèle possibiliste n'est inhérent qu'à un temps donné, mais également à un niveau temporel donné : les modèles réalisés au *temps* 1Ba (c'est-à-dire, concernant les observations réalisées à partir des sites de l'âge du Bronze Ancien IV) ou au *temps* 1A+1Ba (concernant la totalité des sites de l'âge du Bronze Ancien) ne nous donnent pas les mêmes résultats : la prise en compte de la totalité des sites attribuables à un niveau de sous-période

donné transforme de toute évidence les statistiques et les structures spatiales observées, qui rétroagissent sur les résultats du modèle empirique. Faire varier les niveaux temporels d'analyse permet d'enrichir les questionnements sur les biais que peut introduire le découpage en périodes par l'intermédiaire notamment des typologies céramiques, en visualisant concrètement et spatialement les impacts de ce découpage.

- Niveaux de fiabilité : une fois encore, la distinction des divers niveaux de fiabilité présente l'avantage de nous indiquer les cas où cette distinction n'introduit pas de différence considérable dans le modèle (comme c'est le cas pour les *hot-spot*s du *temps* 1Ba par exemple : les modèles élaborés ne changent pas avec l'intégration des sites non fiables dans le calcul) et les cas où cette distinction est fondamentale. Dans notre cas, bien que les résultats du *temps* 1Ba ne changent pas quel que soit le niveau de fiabilité introduit dans l'analyse, nous considérons que celle-ci reste tout de même fondamentale étant donnée la configuration spatiale des données : l'intégration des sites non fiables modifie en effet considérablement les structures spatiales dans la mesure où ceux-ci occupent presque exclusivement une vaste zone au Nord-Ouest de la carte. Se priver de leur intégration, c'est donc aussi se priver d'informations précieuses sur l'étendue possible du peuplement à l'échelle de la zone étudiée.
- Types de configurations spatiales : les différenciations entre les sites, dans les modèles d'occupation du sol passée, sont généralement établies sur des critères inhérents au site en lui-même, c'est-à-dire à l'échelle même du site. Les modèles seront donc élaborés pour les sites d'habitat, funéraires ou à vocation militaire par exemple, si c'est la fonction qui est mise en avant. On pourra également distinguer les sites par leurs matériaux de construction ou bien encore leur taille. Mais plus rares sont les tentatives de différenciation des sites à partir de leurs structures spatiales, c'est-à-dire à une échelle plus petite (au sens géographique), par exemple, celle de la zone d'étude, et plus rare encore est l'intégration de ces informations dans la modélisation des possibilités de peuplement. Considérer dans la modélisation les sites archéologiques comme un simple semis de points dont les attributs ne sont qu'intrinsèques revient à ne considérer que deux échelles d'étude très extrêmes dans l'analyse : celle du site, et celle de la zone étudiée. Selon l'étendue de la zone étudiée, cela peut s'avérer dangereux, cela revenant à ignorer que tous les sites ne relèvent pas forcément (c'est le cas dans notre étude) de modes et de critères d'occupation du sol similaires. Une analyse des types de configurations spatiales (par le calcul des LISA par exemple) peut ainsi permettre, outre l'intérêt en lui-même de l'information produite pour la compréhension des systèmes de peuplement passés, et par l'intermédiaire des régionalisations établies sur la base des structures spatiales, une échelle intermédiaire dans l'observation (et donc, la modélisation) des

phénomènes et des possibles. L'intérêt de la démarche est illustré notamment en ce qui concerne le *temps* 1Bb : ne pas distinguer ce que nous avons appelé les *hot-spots* des *outliers* dans le calcul de la corrélation entre la distance aux cours d'eau et le nombre de sites et donc, prendre en compte la totalité des sites dans le calcul nous aurait conduit à un résultat du coefficient de corrélation très élevé (- 0,95 pour les sites fiables et -0,89 pour la totalité des sites) influencé par les *outliers* et donc, à considérer le paramètre « distance aux cours d'eau » comme un paramètre pertinent de modélisation pour le *temps* 1Bb.

Quoi qu'il en soit, les modèles présentés ici sont de toute évidence très incomplets, et doivent s'inscrire dans une dimension plus large, dépassant le cadre de cette étude qui, en tant qu'exercice académique, n'avait vocation qu'à en élaborer le cadre méthodologique et amorcer le mouvement, et non à en saisir la multitude des dimensions thématiques qui doivent être élaborées dans un cadre profondément interdisciplinaire. La complexité visée ici consistait plus dans la prise en compte des multiples niveaux spatio-temporels et d'incertitude que dans l'intégration de multiples renseignements thématiques au sein du modèle. Les nombreuses tentatives de cet ordre n'ont pu porter leurs fruits car les renseignements dont nous disposions ne pouvaient être traités directement, de manière brute (carte des sols ou des pluies par exemple) mais nécessitaient d'autres traitements en amont pour pouvoir être intégrés dans toute tentative de modélisation, traitements que nous n'étions, pour des raisons de temps principalement, pas en mesure de pouvoir fournir. Ces tentatives concernaient principalement le paramétrage d'un système d'inférence *flou* permettant, à la manière d'un système expert, de gérer une multitude de règles définies à partir de la quantification *floue* de plusieurs paramètres dont les combinaisons diverses permettent d'évaluer les divers sous-espaces de zone étudiée en fonction de la plus ou moins grande représentation de ces critères. Ces tentatives ont été réalisées à l'aide du freeware FisPro élaboré par Serge Guillaume (Guillaume, Charnomordic, 2011 ; 2013) -ne permettant toutefois pour le moment que d'envisager le *flou de type 1*.

La démarche adoptée dans ce chapitre s'inscrit dans une chaîne de raisonnement exploratoire plus large où l'on tente tout d'abord de dégager les niveaux spatiaux, temporels et d'incertitude auxquels s'expriment les données en allant du général au particulier, avant d'en modéliser certaines inconnues sous la forme de *possibles* (Figure 132).

Il en résulte qu'aucune des informations produites, quelle que soit l'étape considérée, n'a la vocation –ni la prétention- d'être considérée comme un « résultat » arrêté et immuable, mais est plutôt considérée comme une sorte de « moteur » propulsant l'étude et les analyses dans diverses directions. A chacune de ces étapes, nous avons tenté de conserver le plus possible de niveaux

d'analyse afin d'aborder les questionnements qui émergeaient sous des angles variés, et de telle sorte que chacune de ces dimensions nous fournisse un maximum de recul et d'esprit critique sur les informations obtenues.

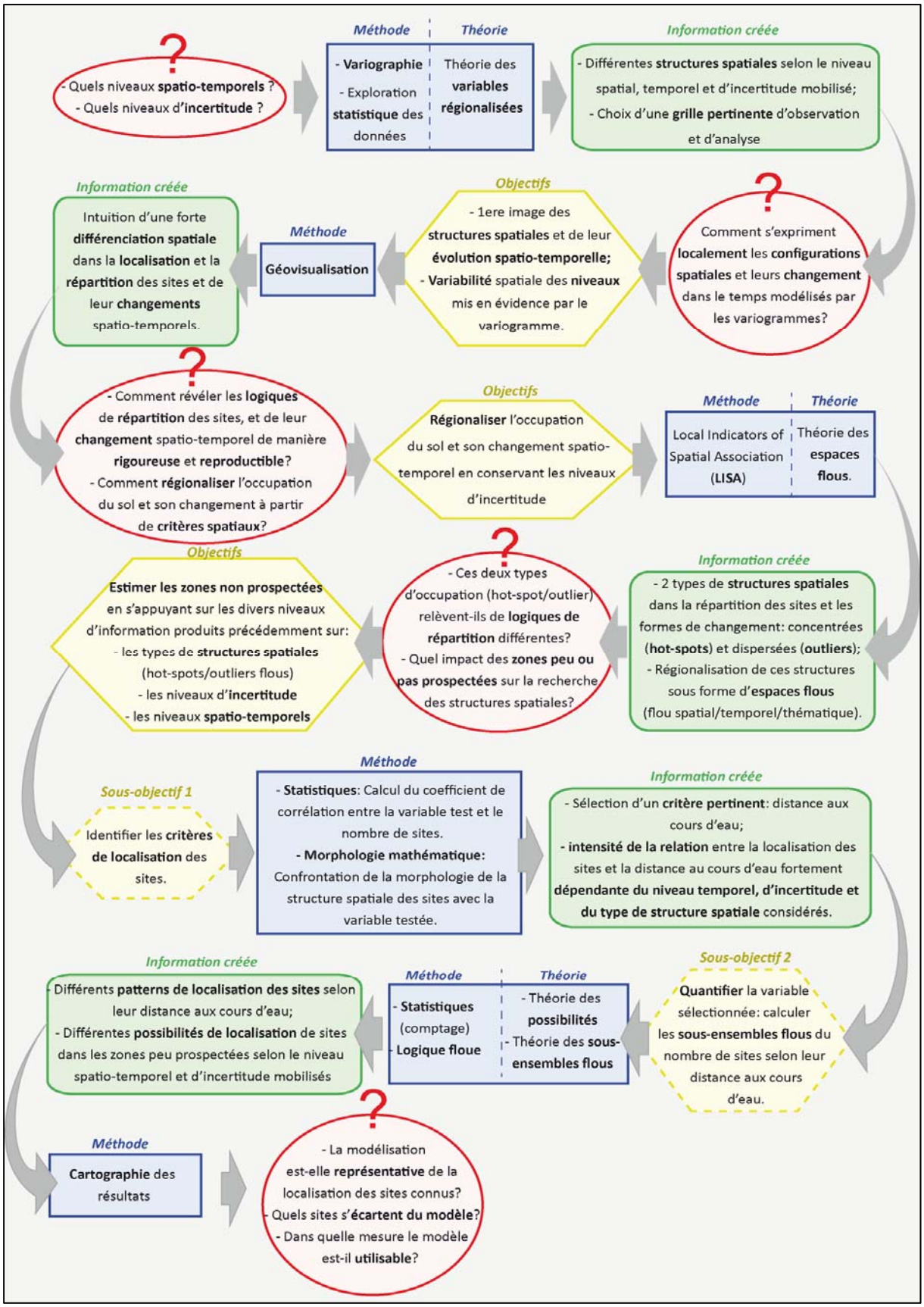


Figure 132 - La chaîne de raisonnement développée dans la partie III.

Conclusion générale

Au bout du compte, les conclusions aboutissent parfois à la plus grande fragilité et passent, au prix d'oublis curieux. Ce qui compte c'est la démarche, l'essai – éventuellement contradictoire - de chemins variés. N'oublions pas que l'analyse statistique la plus sophistiquée ne peut qu'amener au rejet de certaines hypothèses et non à l'affirmation d'une vérité.

Marcel RONCAYOLO (2002)

L'objectif de ce travail consistait à élaborer un cadre méthodologique et interprétatif permettant d'aborder une problématique archéologique en ayant conscience des biais que peuvent y introduire les catégorisations spatio-temporelles et les divers types d'incertitude relatifs aux données. Appréhender ces biais et tenter de s'en affranchir nous a conduite à cheminer dans la voie « libre » de l'analyse spatiale (ou plutôt, spatio-temporelle) exploratoire, tout en nous appuyant sur des socles théoriques et méthodologiques variés : si notre étude s'inscrit fondamentalement dans le cadre de l'analyse spatiale, nous avons été conduite à mobiliser l'approche de la géoprospective –relevant, elle aussi, de l'analyse spatiale- et des théories de la complexité au sens large, dans lesquelles peuvent s'inscrire les théories des ensembles flous et des possibilités. La structure de cette thèse suit ainsi le cours des questionnements que nous nous sommes posés ou de nos besoins au fil de l'enchaînement des différentes étapes, et de notre progression dans la connaissance –ou, plus souvent, la connaissance de notre méconnaissance- de l'objet d'étude (Figure 133).

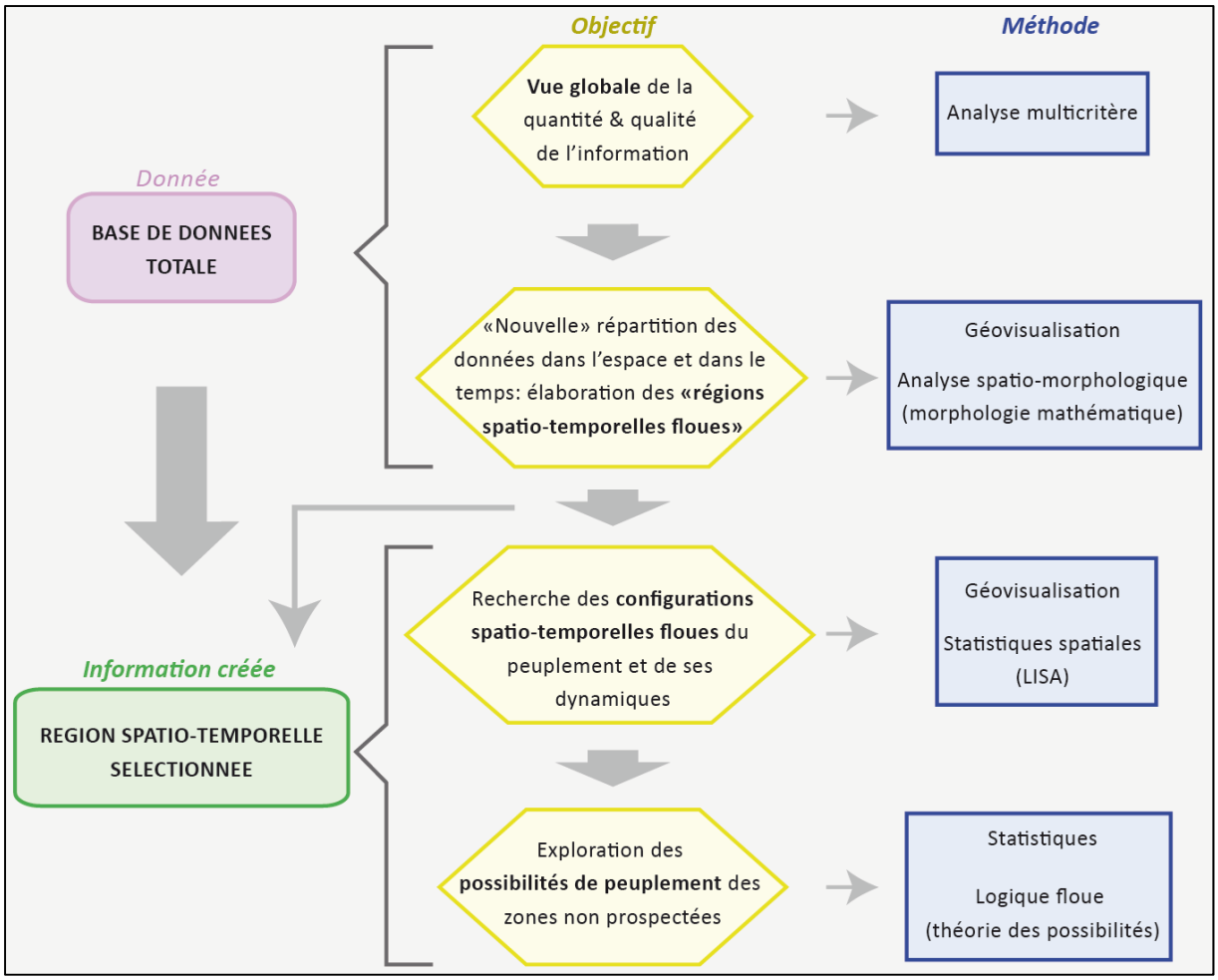


Figure 133 - Raisonnement général de la thèse

Notre premier objectif – formulé par l'équipe de recherche – fut celui d'élaborer une image claire d'une base de données vaste réunissant une information très hétérogène. Cette étape était d'autant nécessaire qu'elle serait déterminante à la fois de la formulation spatio-temporelle « locale » de notre propre objet d'étude, mais aussi qu'elle permettrait de remettre en perspective certaines analyses –notamment comparatives- réalisées au cours de ces dernières années sans tenir compte des divers niveaux de qualité de l'information ayant permis de formuler les hypothèses, concernant notamment la spatialité des peuplements. Ces études et les hypothèses qui en sont ressorties constituant une partie de notre propre « background » interprétatif, il était selon nous fondamental de les observer sous un éclairage différent afin de savoir véritablement « d'où nous partions » dans l'information disponible – sous forme de données mais aussi d'interprétations.

C'est ce besoin de clarté et de mise en perspective qui a déterminé nos questionnements, nos orientations et nos choix dans la première partie des traitements (Partie II de l'étude). Ainsi, après avoir cherché à obtenir l'image la plus globale et la plus synthétique de la qualité et de la quantité

d'information disponible dans la base de données (réalisée à l'aide de l'analyse multicritères) et de ses variations dans le temps, nous nous sommes interrogée sur les incidence spatiales de certaines de ces variations. Nous allions devoir trouver un mode de répartition des données « efficace » dans le temps, étant donnée la multitude de niveaux de précision de l'information temporelle à gérer. A partir de l'unité de temps choisie (le siècle), nous avons testé deux modes de répartition des unités archéologiques au sein de chaque unité, dans le but de tester et d'observer la dépendance des données et des structures spatiales recherchées aux périodes auxquelles elles sont associées. Après la dépendance temporelle, nous nous sommes interrogée sur la dépendance spatiale entre les résultats des études menées à échelle régionale et la délimitation des zones de prospection. Par un enchaînement de méthodes d'analyse spatio-morphologique, nous avons ainsi identifié des « régions spatio-temporelles *floues* » proposant une vue différente de la chronologie, sous l'angle des structures spatiales et de leurs dynamiques, mais intégrant l'incertitude qui y est attachée.

Le parti pris mis en exergue dans cette partie de l'étude consiste à mobiliser l'analyse spatiale non uniquement dans le but de produire des résultats thématiques sur les modes d'occupation du sol des systèmes de peuplement et de leurs dynamiques, mais également comme un moyen de changer de perspective sur les régionalisations temporelles –les périodes- et spatiales –les zones de prospection- qui conditionnent fortement les études. L'analyse spatiale – ou plus justement: spatio-temporelle - n'intervient ainsi pas exclusivement *après* mais aussi *pendant* la mise en forme des données et du cadre interprétatif, et peut nous permettre d'aborder cette problématique par une de ses entrées *possibles*.

Une fois le cadre interprétatif élaboré, nous avons pu étudier une région spatio-temporelle sous un angle plus thématique, tout en testant systématiquement l'impact des divers niveaux spatiaux, temporels et d'incertitude auxquels s'expriment les données -et en créant de nouveaux niveaux à l'aide de méthodes de statistique spatiale telles que le calcul des LISA- sur les structures observées et sur leurs dynamiques spatio-temporelles. A partir de ces multiples niveaux d'information, l'objectif était de proposer divers *possibles* de l'occupation du sol des zones peu prospectées, dont la variété dépendrait moins des connaissances et hypothèses thématiques mobilisées pour leur élaboration que du niveau d'observation envisagé. L'ouverture des *possibles* dépend ainsi ici de la qualité -ou encore de la précision du niveau temporel- des données que l'on mobilise dans l'élaboration du modèle. Ce parti pris est relatif à notre vision de la complexité qui doit s'exprimer, en matière de modélisation de l'occupation du sol passée, moins dans une multiplication des paramètres thématiques que dans une conception multi-niveaux des

dimensions spatiale, temporelle et d'incertitude de la donnée archéologique, et des structures spatio-temporelles que l'on pense identifier. Nous insistons à cette occasion à nouveau sur l'intérêt d'une régionalisation des phénomènes archéologiques dans une dimension résolument spatio-temporelle tels que ceux mis en exergue par le calcul de l'algorithme du graphe perceptuel ou des LISA : ceux-ci permettent de s'écarter – même momentanément – d'une vision et d'une répartition des données uniquement basée sur leur dimension thématique, c'est-à-dire issue des modes de raisonnement historique, environnemental et archéologique, et d'explorer les indices que peuvent nous donner leur répartition et leur corrélation spatio-temporelle sur les modes d'occupation du sol. Les différences frappantes dans les critères de localisation proposés dans la dernière partie de cette étude entre les sites participant aux clusters *hot-spot* et les *outliers* montre bien la nécessité de s'interroger et de tester l'existence de ces différenciations spatio-temporelles et d'intégrer celles-ci dans l'élaboration des scénarios des « passés possibles ».

Il sera cependant fondamental de ne pas se borner à considérer uniquement l'incertitude de la donnée archéologique, et prendre également en compte celle de la donnée environnementale, par exemple (ici, les cours d'eau) à partir desquelles nous évaluons les critères et les logiques d'occupation du sol. Quelles que soient les données dont on dispose, qu'elles soient issues de recherches paléoenvironnementales ou non, celles-ci ne peuvent retracer avec exactitude les contextes environnementaux passés. Notre choix initial s'est porté sur les cours d'eau car comme nous l'avons précisé, il s'agissait de la donnée la plus « pratique » à utiliser dans l'immédiat et *a priori* la moins imprécise et incertaine, mais un prolongement de la démarche mettant ce paramètre en perspective (et en testant l'intégration d'autres paramètres) sera envisagée dans les traitements à venir. Les modèles proposés ici ont ainsi pour le moment une portée plus réflexive que véritablement appliquée: ils ne permettent que d'envisager les *possibles* sous l'angle de vue restreint et « le plus commode », celui de la distance des sites aux cours d'eau, tout en visualisant les écarts aux modèles proposés (c'est-à-dire, les sites des zones bien prospectées qui ne sont pas situés dans des zones « vertes »).

Bien que les diverses étapes de la méthodologie aient été guidées par nos propres interrogations au fil de l'exploration de la base de données et de l'objet d'étude, ces questionnements sont toujours de nature méthodologique sur les points de vue à adopter, et non thématique : notre positionnement en tant que géographe *de facto* étrangère aux présupposés ou enjeux thématiques historiques et archéologiques nous a permis de cheminer au fil de la méthode et des points de vue, en ne tenant aucun résultat ou hypothèse pour admis. L'objectif étant la reproductibilité de la démarche : les questions posées peuvent s'appliquer à toute base de données archéologique, quel

que soit l'espace - temps considéré. Cet aspect pourra en outre, nous l'espérons, favoriser l'harmonisation de certains modèles de peuplement en appliquant ce protocole méthodologique à diverses régions ou zones de prospection (« Syrie du Sud », « Palmyrène »…) par exemple, mais en le proposant également aux équipes internationales travaillant sur des espaces analogues (la région de Homs, par exemple, pour l'équipe britannique), dans le but de questionner et d'accroître la portée comparative de ces diverses régions.

Sur le plan conceptuel, le parti-pris développé au cours de cette recherche est celui d'une prise en compte simultanée de l'espace et du temps : nous avons à ce titre tenté de « réinjecter le spatial » absent des chronologies, par la constitution des « régions spatio-temporelles ». Nous pensons en effet qu'envisager les phénomènes dans une dimension d' « espace-temps » est adapté pour saisir la mouvance et la complexité du vivant, et à l'envisager sous une approche véritablement multiscalaire. Ainsi, nous préférons le terme d'analyse « spatio-temporelle » à celui d' « analyse spatiale » : sonder l'espace revient inévitablement à sonder aussi le temps. Ce qui ne signifie pas pour autant que ces deux dimensions soient parallèles ou symétriques, notamment dans la manière dont elles s'expriment à travers les données : si nous pouvons connaître assez simplement et précisément la localisation d'un site archéologique à l'aide d'un GPS, connaître le moment de sa construction et sa durée d'occupation demeure beaucoup plus incertain. Cette remarque vaut toutefois si l'on considère chaque site ou artefact archéologique isolément, mais s'applique bien moins à la recherche des structures spatio-temporelles, c'est-à-dire dès que l'on change d'échelle : les liens qui unissent deux sites en termes d'interaction ou de causalité relèvent bien d'une incertitude « spatio-temporelle » car nous ne savons avec certitude ni si les sites considérés étaient contemporains, ni si la distance qui les sépare a pu être un facteur d'interaction ou d'absence d'interaction. Ainsi, bien plus qu'elle ne scinde les dimensions « spatiale » et « temporelle » nous envisageons qu'une conceptualisation et une prise en compte de l'incertitude au cœur même des analyses puisse constituer le ciment qui permette de réconcilier ces deux dimensions du point de vue de la recherche en archéologie et en géographie au profit d'un « espace-temps *flou* ».

Nous avons ainsi trouvé dans le « roseau » du *flou* un cadre plus souple, flexible et donc, solide que dans le « chêne » des catégories figées et des fausses certitudes, et ce notamment grâce au *flou de type 2*. Nous envisageons de prolonger nos recherches dans cette direction, dans un travail « d'équipe » plus adapté que celui permis par l'exercice académique de la thèse : ce projet consiste à reprendre la chronologie utilisée par les différentes missions de recherche – du programme PaléoSyr ou plus largement - et en réalisant une chronologie *floue*, c'est-à-dire dont les « périodes »

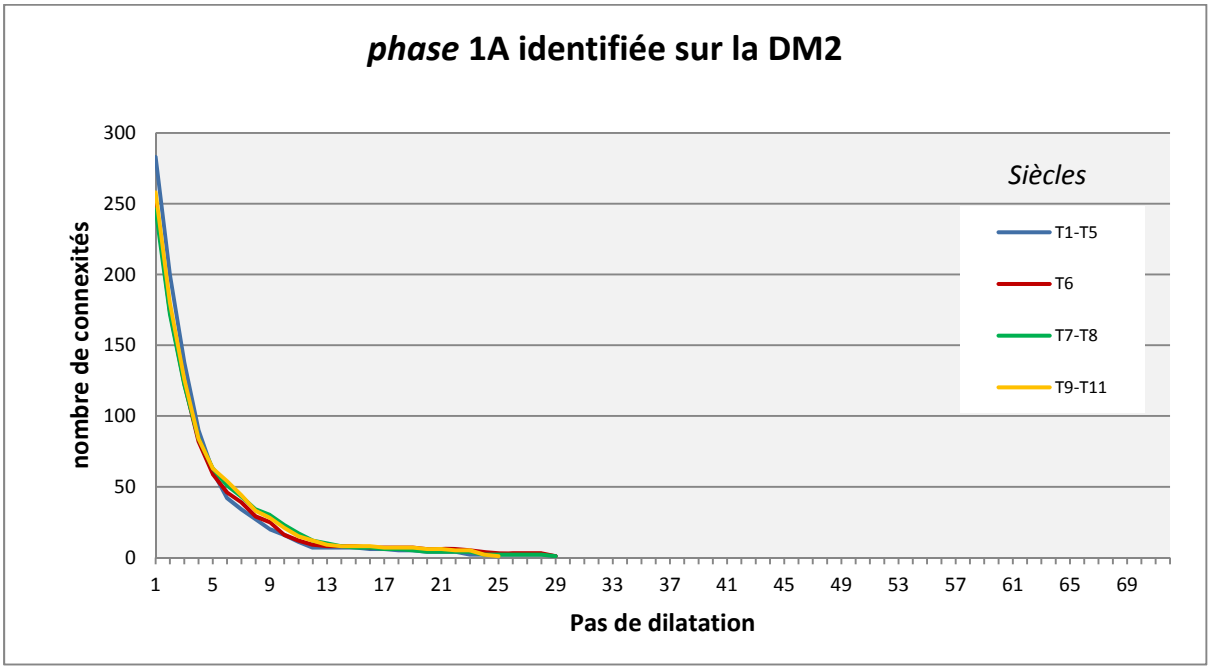
correspondraient à des sous-ensembles flous déterminés relativement à notre niveau de connaissance sur l'UNAR considérée, et au sein desquelles chaque UNAR pourrait être replacée selon divers degrés d'appartenance.

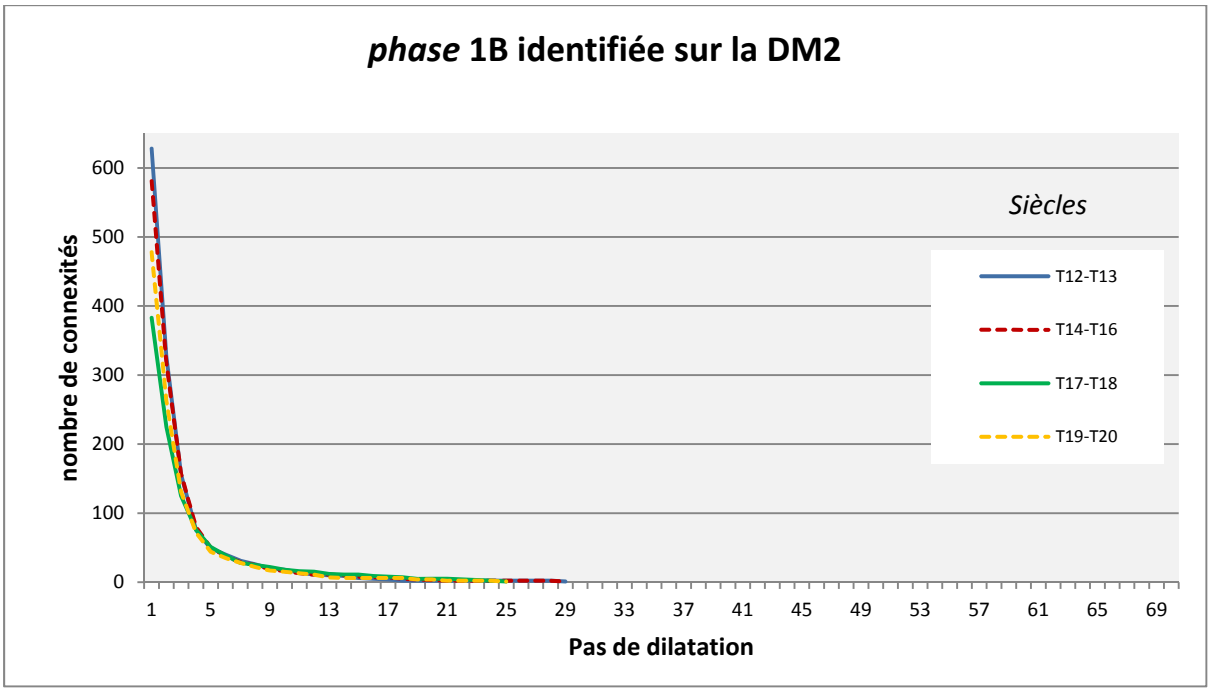
Si l'opportunité nous est donnée de travailler encore plus en amont des procédures de datation, l'élaboration de typologies – céramiques ou d'objets lithiques, plus globalement des objets à partir desquels s'effectue le processus de datation - *floues* permettrait en outre d'intégrer avec plus de profondeur l'incertitude dans la mise au point des chronologies. Cette nouvelle approche de la datation permettrait certainement une perception plus « réaliste » des processus, ou tout au moins de notre connaissance sur ces processus, ainsi que de la contemporanéité supposée des objets archéologiques et donc de leurs interactions.

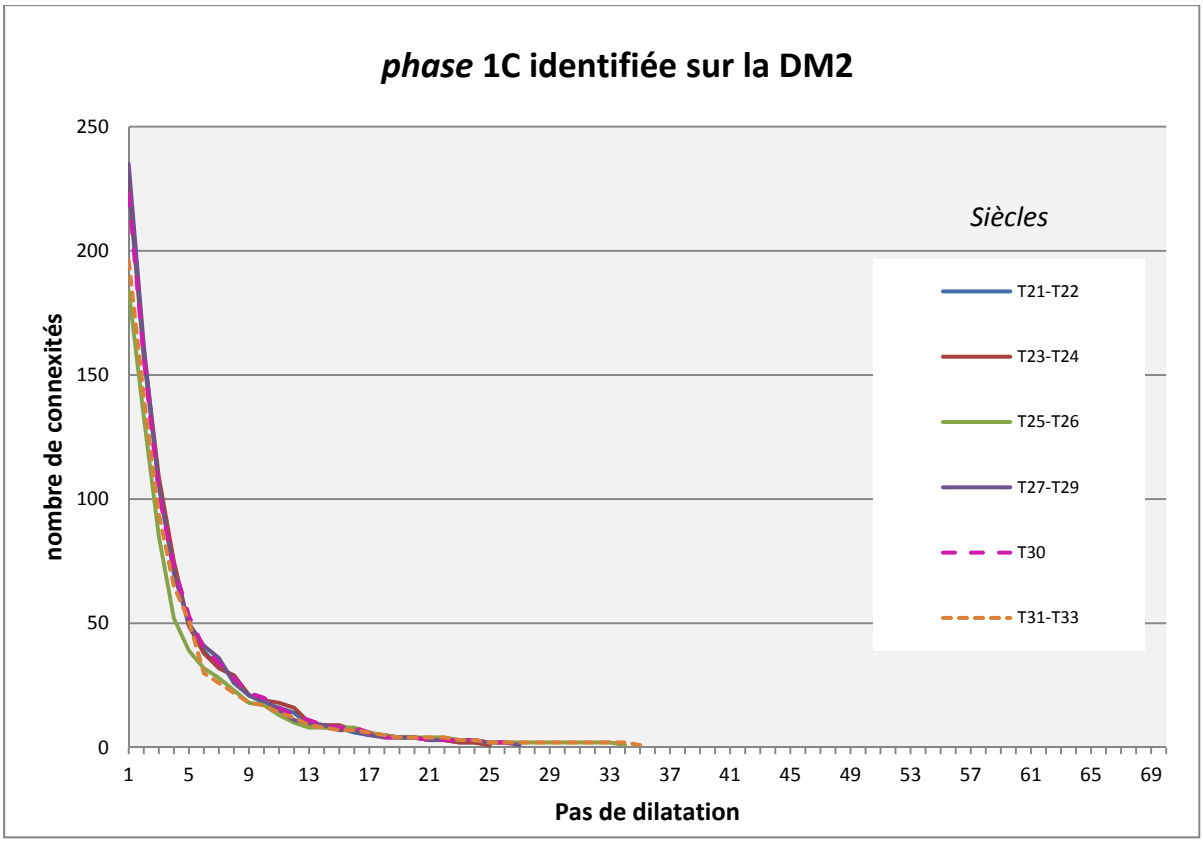
Ces réflexions vont cependant au-delà du cadre strictement archéologique ou historique, et peuvent également s'appliquer aux bases de données et aux problématiques géographiques pour peu que l'on s'intéresse aux dynamiques spatio-temporelles de phénomènes incertains. C'est par exemple le cas en géoprospective, qui se base sur les tendances passées (certes plus récentes que les temps ici étudiés mais matérialisé par des données elles aussi conditionnées par des choix spatiaux et temporels, et empreintes d'incertitude) pour proposer une évaluation des futurs possibles. Nous souhaiterions ainsi également envisager notre approche comme une passerelle entre les deux disciplines, afin qu'une conception et une évaluation du passé dans toute son incertitude et sa diversité de niveaux d'observation permette une ouverture du champ dans l'exploration des futurs possibles, dont l'ouverture dépendrait certes des hypothèses thématiques introduites dans l'élaboration de ces scénarios, mais également, ce qui est beaucoup plus rare, de la qualité de l'information et des niveaux spatio-temporels envisagés. La complexité recherchée en géoprospective (Emsellem et al., 2012) ne reposerait alors pas, comme nous l'avons proposé pour l'évaluation des « passés possibles » en archéologie, uniquement sur la multiplication des paramètres du modèle (sociaux ou environnementaux par exemple) mais sur la multiplication des niveaux spatio-temporels et d'incertitude de l'information, et sur le test de la répercussion de chacun d'entre eux sur les résultats et les scénarios obtenus. La méthodologie ici développée prendrait ainsi une dimension d'aide à la décision dépassant le cadre de l'archéologie, celle-ci pouvant rétroagir sur l'évaluation – et la construction - des évolutions futures.

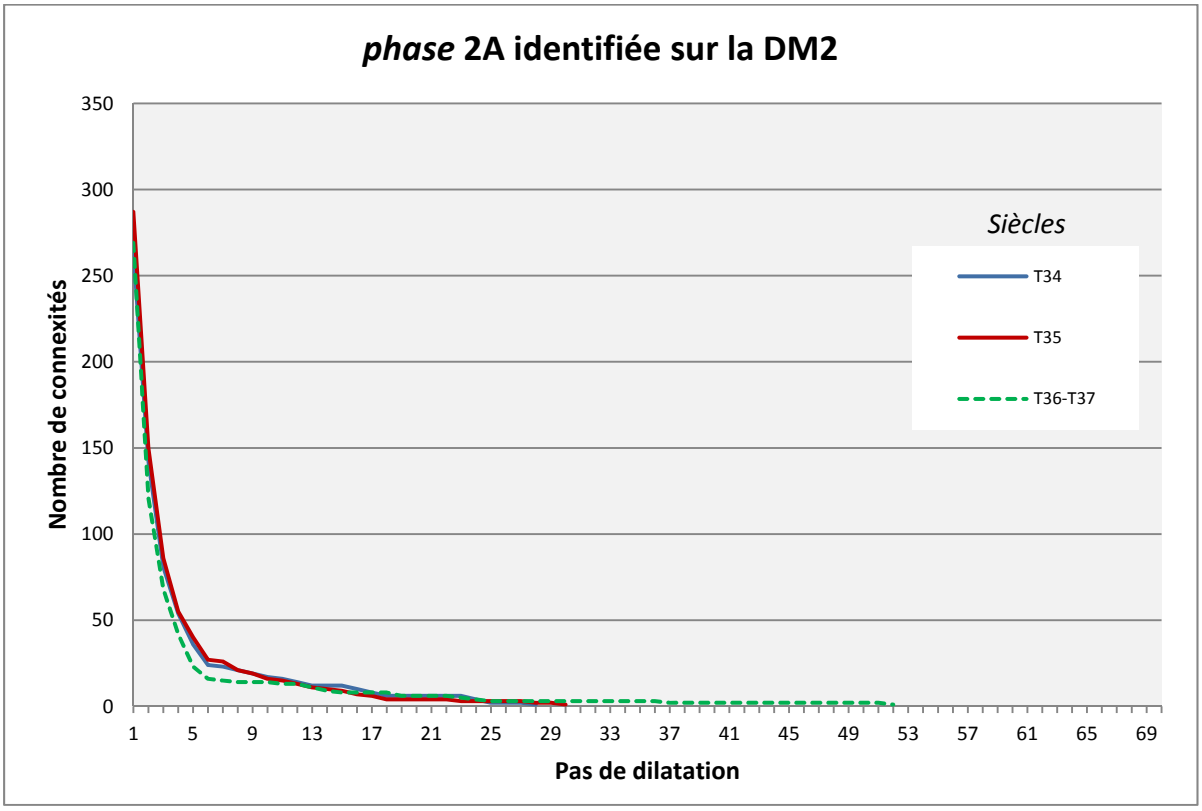
Annexes

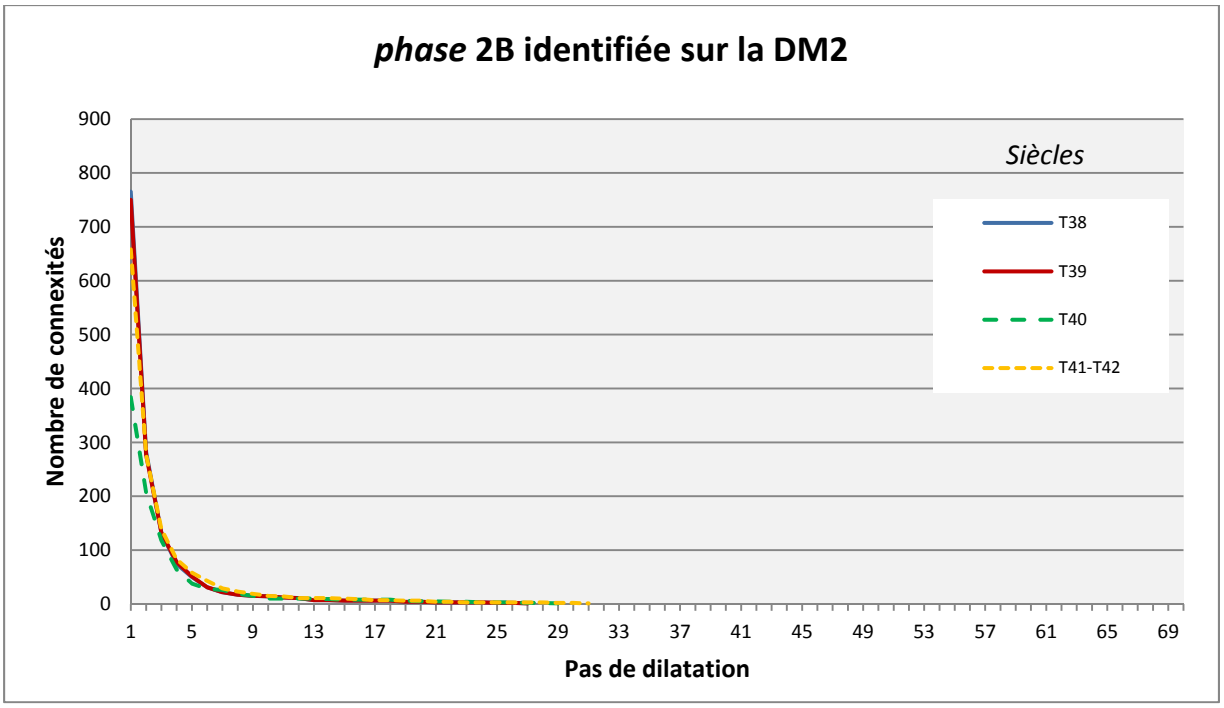
Annexe 1 - Courbes des connexités des UNAR pour chaque siècle (méthode 2 de répartition des UNAR dans le temps) regroupées par *phase*

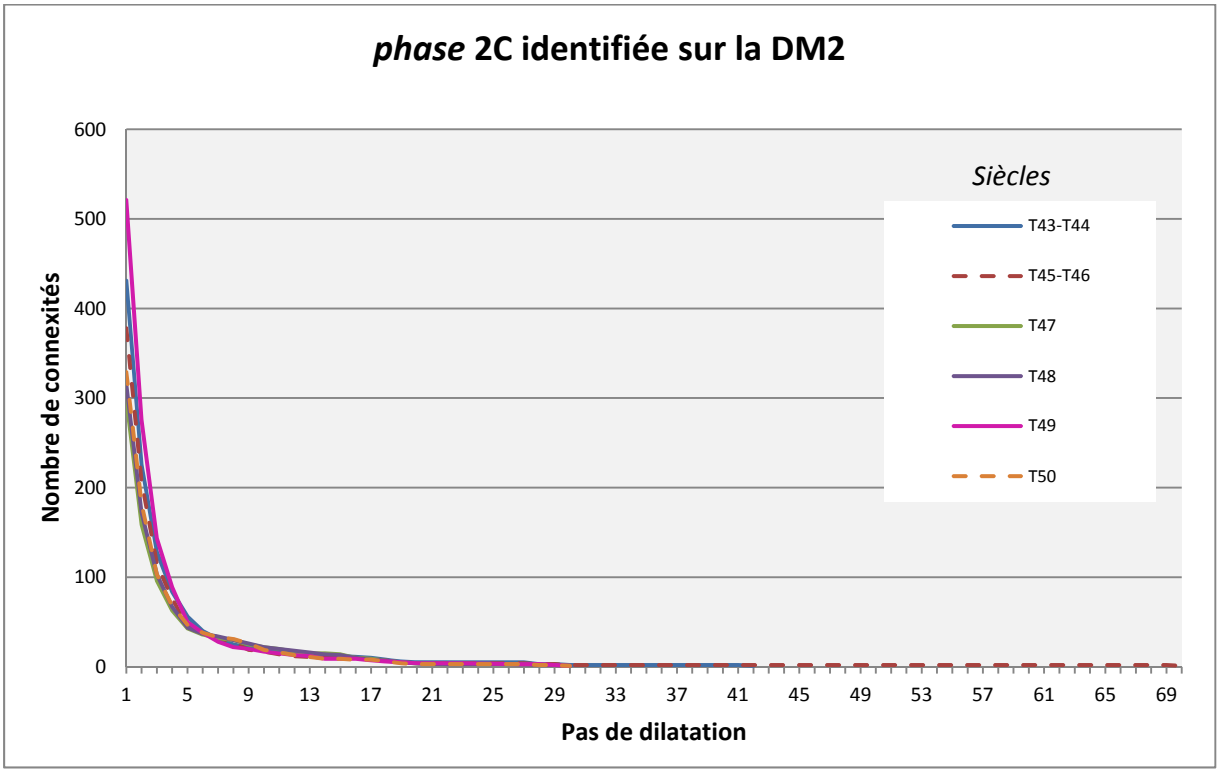





phase 1C identifiée sur la DM2
nombre de connexités
Pas de dilatation
Siècles
T21-T22
T23-T24
T25-T26
T27-T29
T30
T31-T33
0
50
100
150
200
250
1
5
9
13
17
21
25
29
33
37
41
45
49
53
57
61
65
69

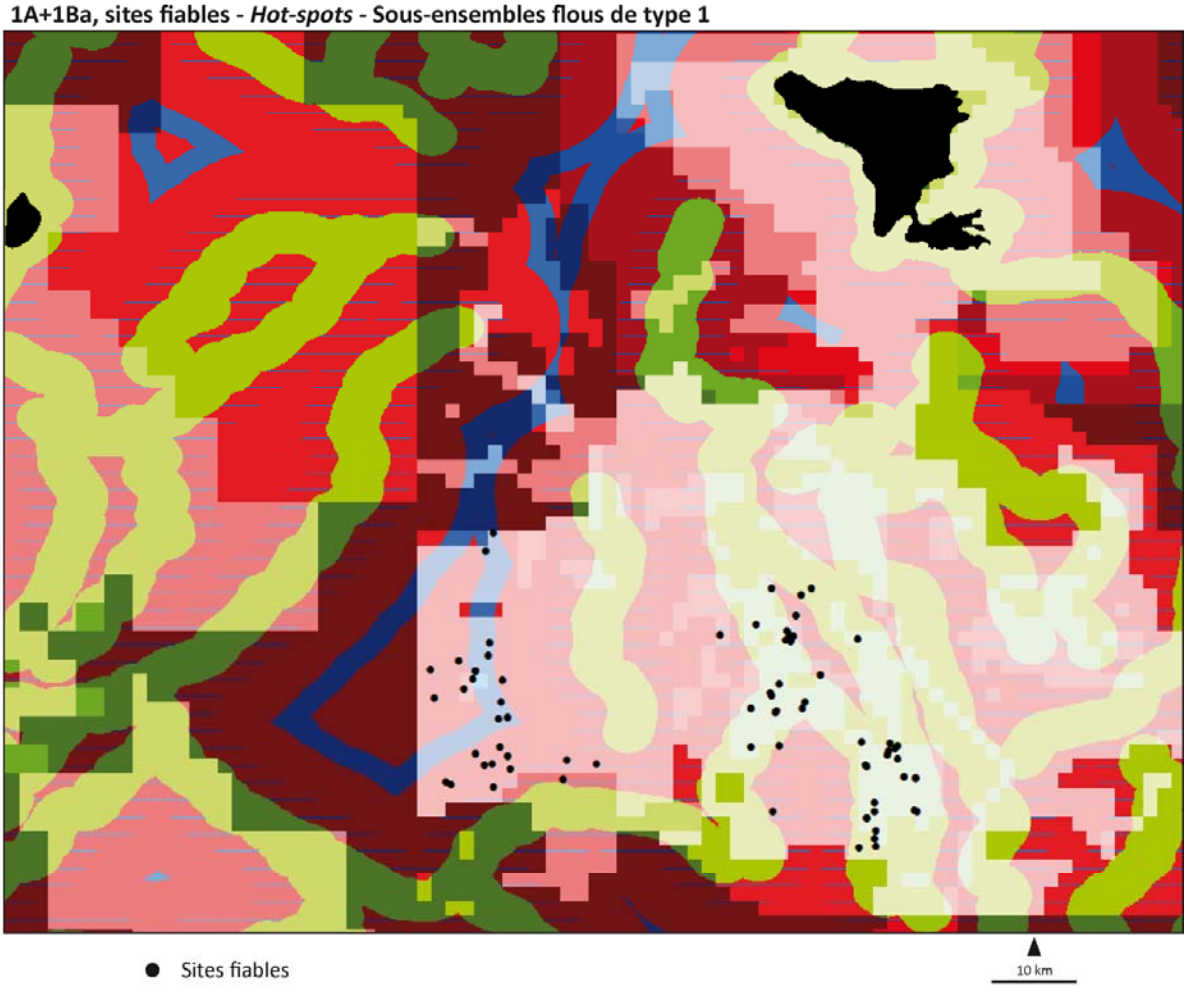

phase 2A identifiée sur la DM2
Nombre de connexités
Pas de dilatation
Siècles
T34
T35
T36-T37
0
50
100
150
200
250
300
350
1
5
9
13
17
21
25
29
33
37
41
45
49
53
57
61
65
69


phase 2B identifiée sur la DM2
Nombre de connexités
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
1 5 9 13 17 21 25 29 33 37 41 45 49 53 57 61 65 69
Pas de dilatation
Siècles
T38
T39
T40
T41-T42

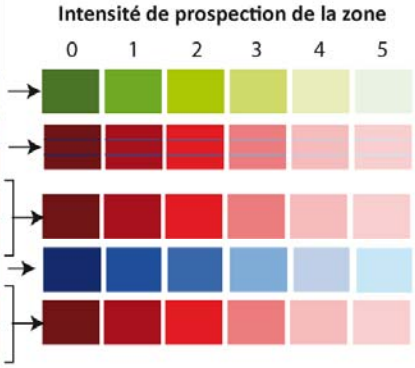

phase 2C identifiée sur la DM2
Nombre de connexités
600
500
400
300
200
100
0
1 5 9 13 17 21 25 29 33 37 41 45 49 53 57 61 65 69
Pas de dilatation
Siècles
T43-T44
T45-T46
T47
T48
T49
T50

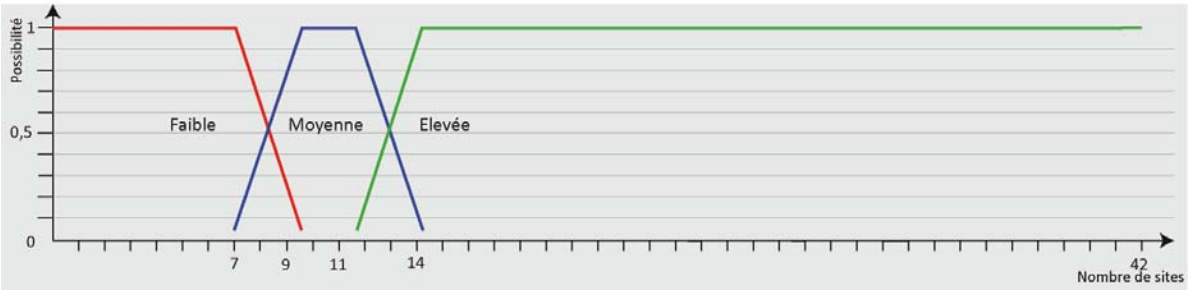
Annexe 2 - Possibilités de localisation des sites évaluées à partir des sous-ensembles flous des *temps* 1A+1Ba

1A+1Ba, sites fiables - *Hot-spots* - Sous-ensembles flous de type 1

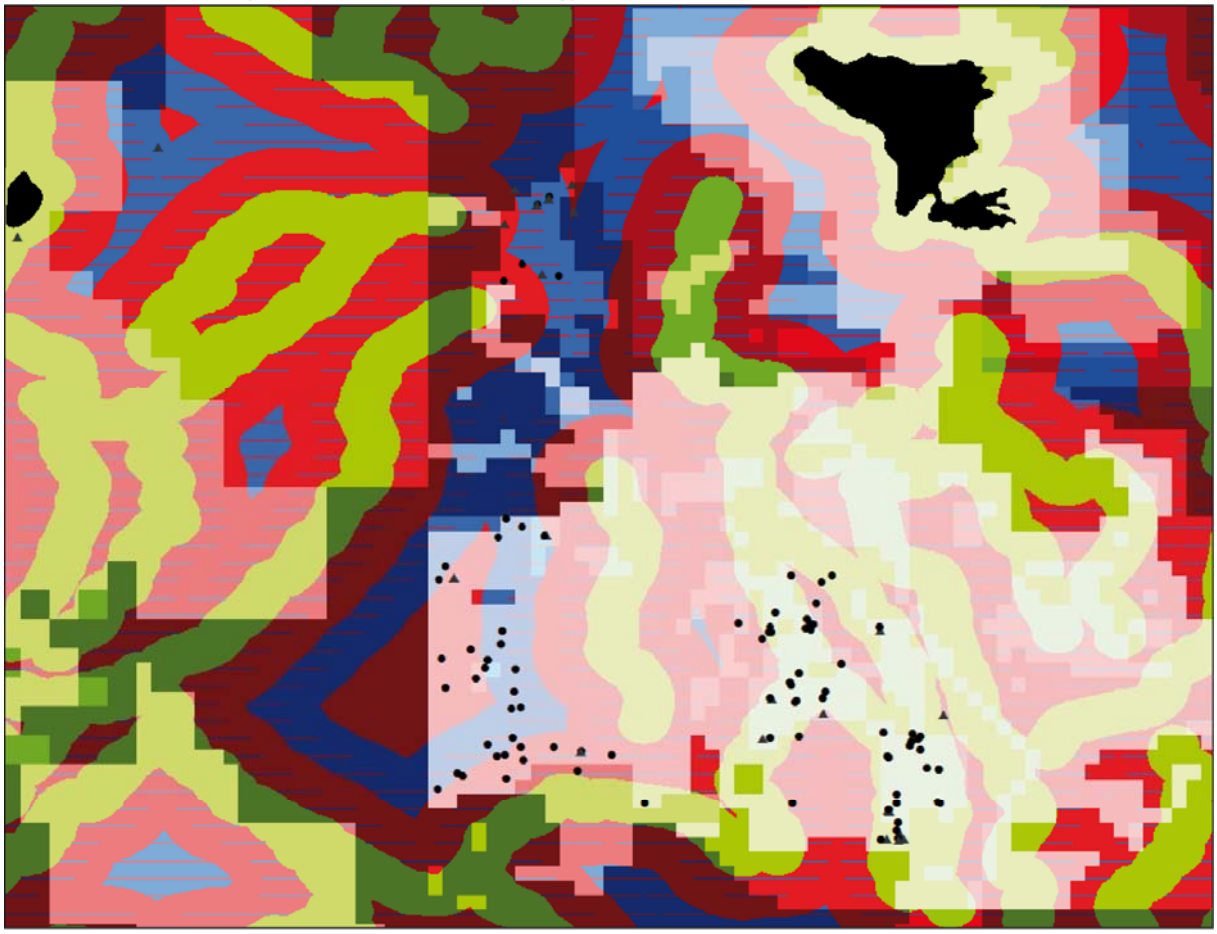


distance au cours d'eau	Possibilité de sites		Possibilité en %
3 km	Elevée	1	100
6 km	Moyenne	0,4	40
	Faible	0,6	60
9 km	Faible	1	100
12 km	Faible	1	100
15 km	Moyenne	1	100
18 km	Faible	1	100
21 km	Faible	1	100





1A+1Ba, tous sites - *Hot-spots* - Sous-ensembles flous de type 1



● Sites fiables

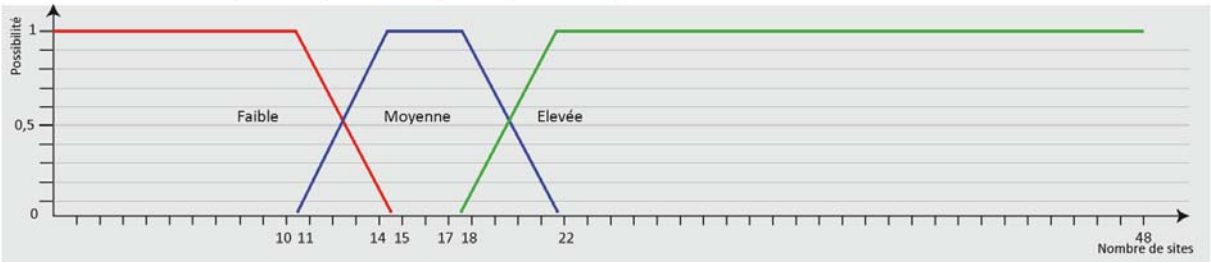
▲ Sites non fiables

10 km

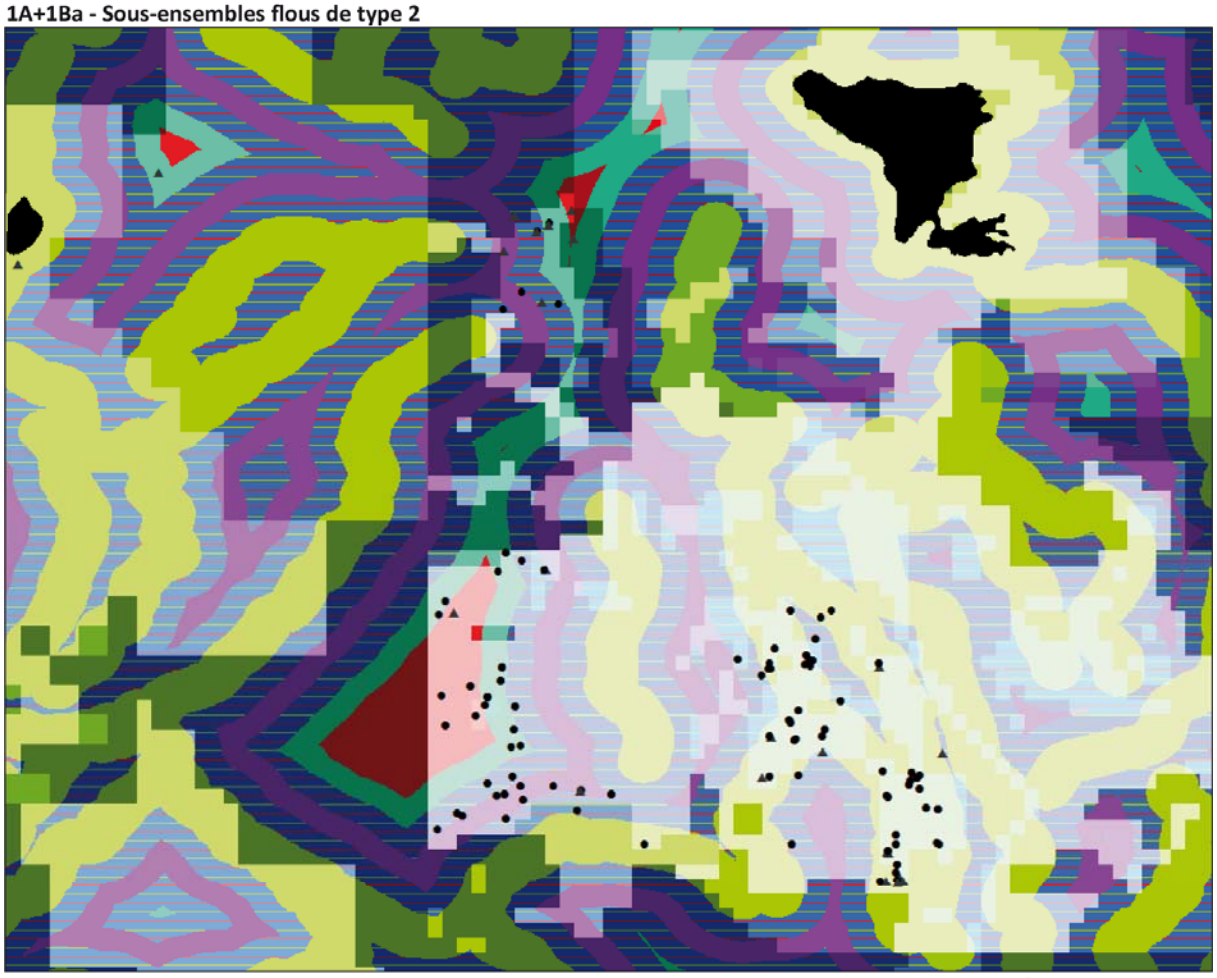
distance au cours d'eau	Possibilité de sites		Possibilité en %
3 km	Elevée	1	100
6 km	Faible	0,6	60
	Moyenne	0,4	40
9 km	Faible	1	100
12 km	Moyenne	0,7	70
	Faible	0,3	30
15 km	Moyenne	1	100
18 km	Faible	1	100
21 km	Faible	1	100

Intensité de prospection de la zone

0 1 2 3 4 5



1A+1Ba - Sous-ensembles flous de type 2



● Sites fiables

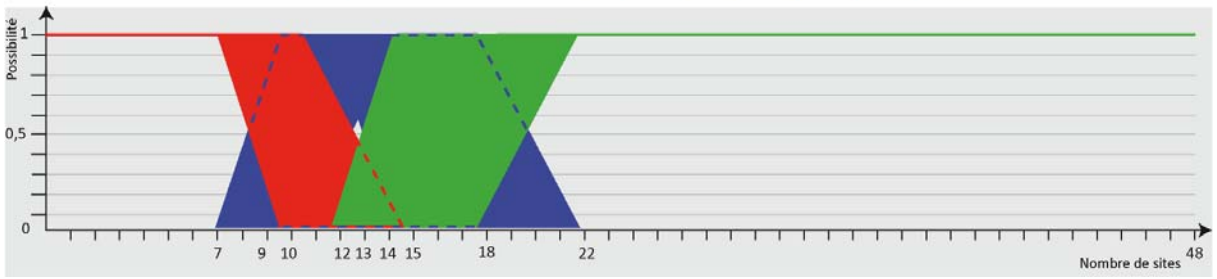
▲ Sites non fiables

10 km

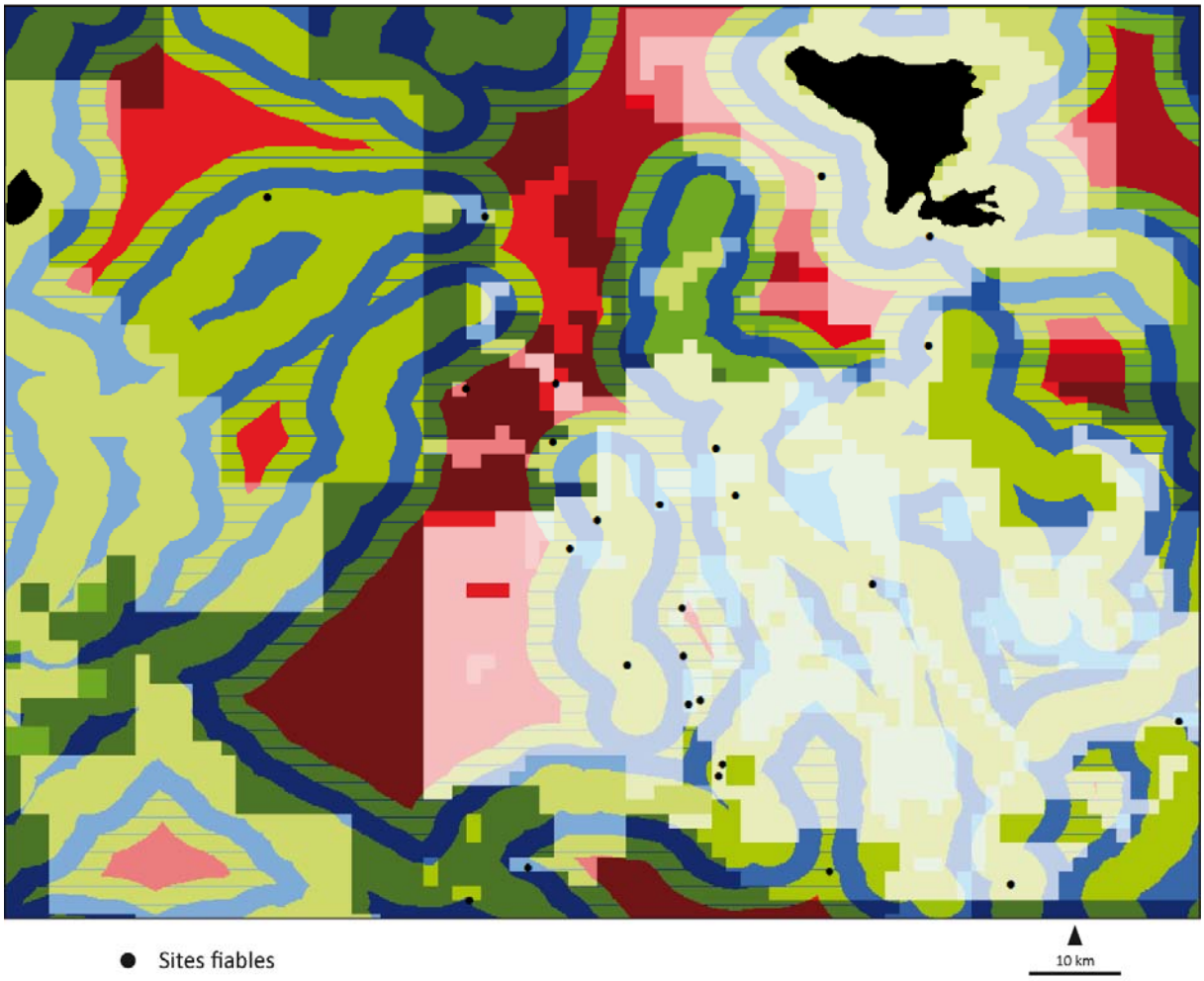
distance au cours d'eau	Possibilité de sites	
3 km	Elevée	1
6 km	Faible	0 - 0,7
	Moyenne	1
	Elevée	0-0,1
9 km	Faible	1
	Moyenne	1
12 km	Elevée	0 - 0,5
	Moyenne	0,5 - 1
	Faible	0 - 0,4
15 km	Elevée	1
	Moyenne	1
18 km	Faible	1
21 km	Faible	1

Intensité de prospection de la zone

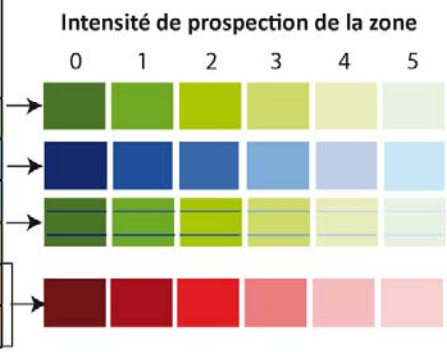
0 1 2 3 4 5

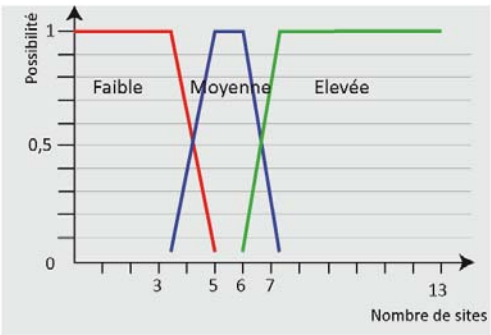


1A+1Ba, sites fiables - *Outliers* - Sous-ensembles flous de type 1

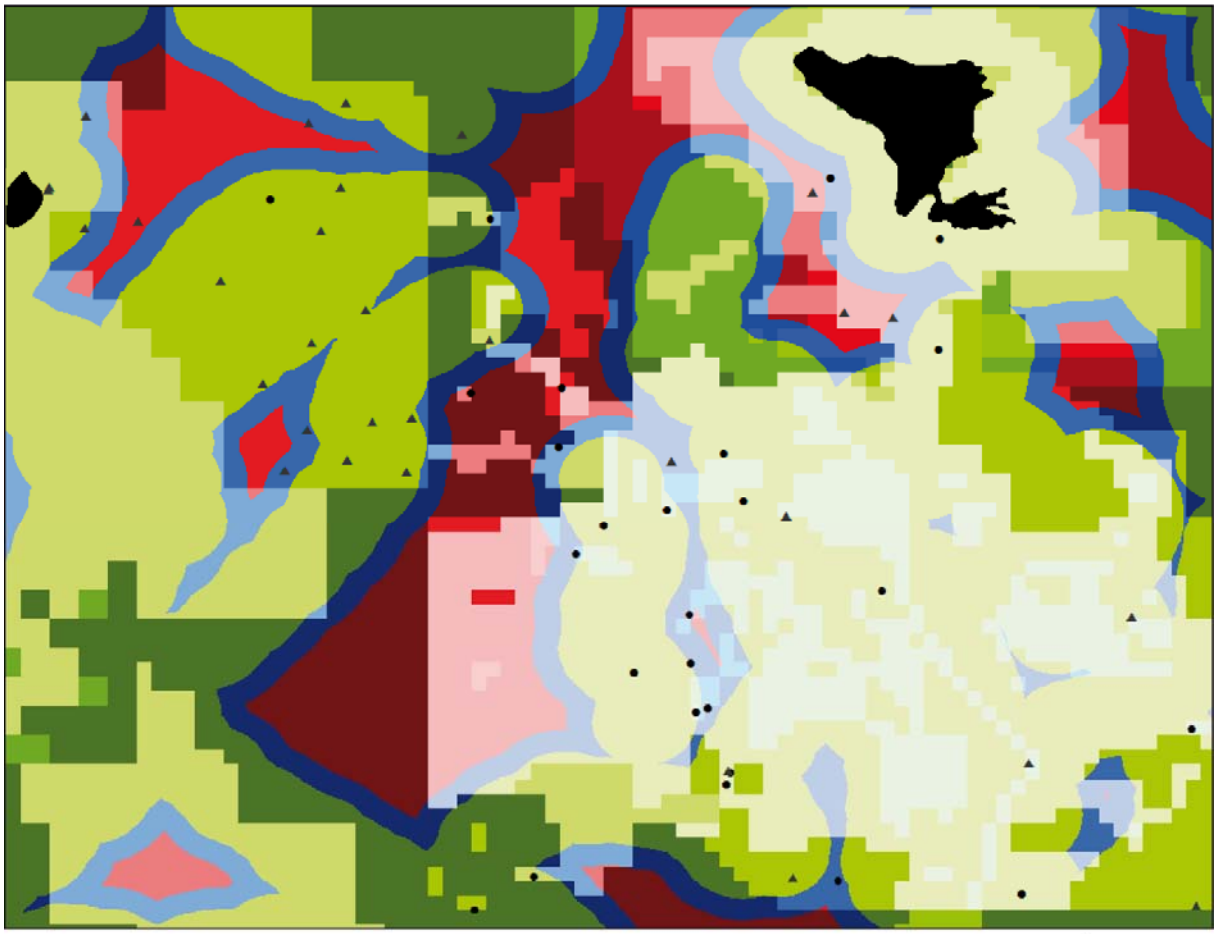


distance au cours d'eau	Possibilité de sites		Possibilité en %
3 km	Elevée	1	100
6 km	Moyenne	1	100
9 km	Moyenne	0,2	20
	Elevée	0,8	80
12 km	Faible	1	100
15 km	Faible	1	100





1A+1Ba, tous sites - *Outliers* - Sous-ensembles flous de type 1



● Sites fiables

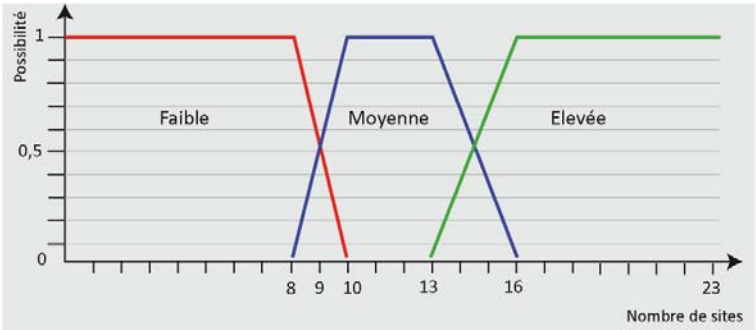
▲ Sites non fiables

▲ 10 km

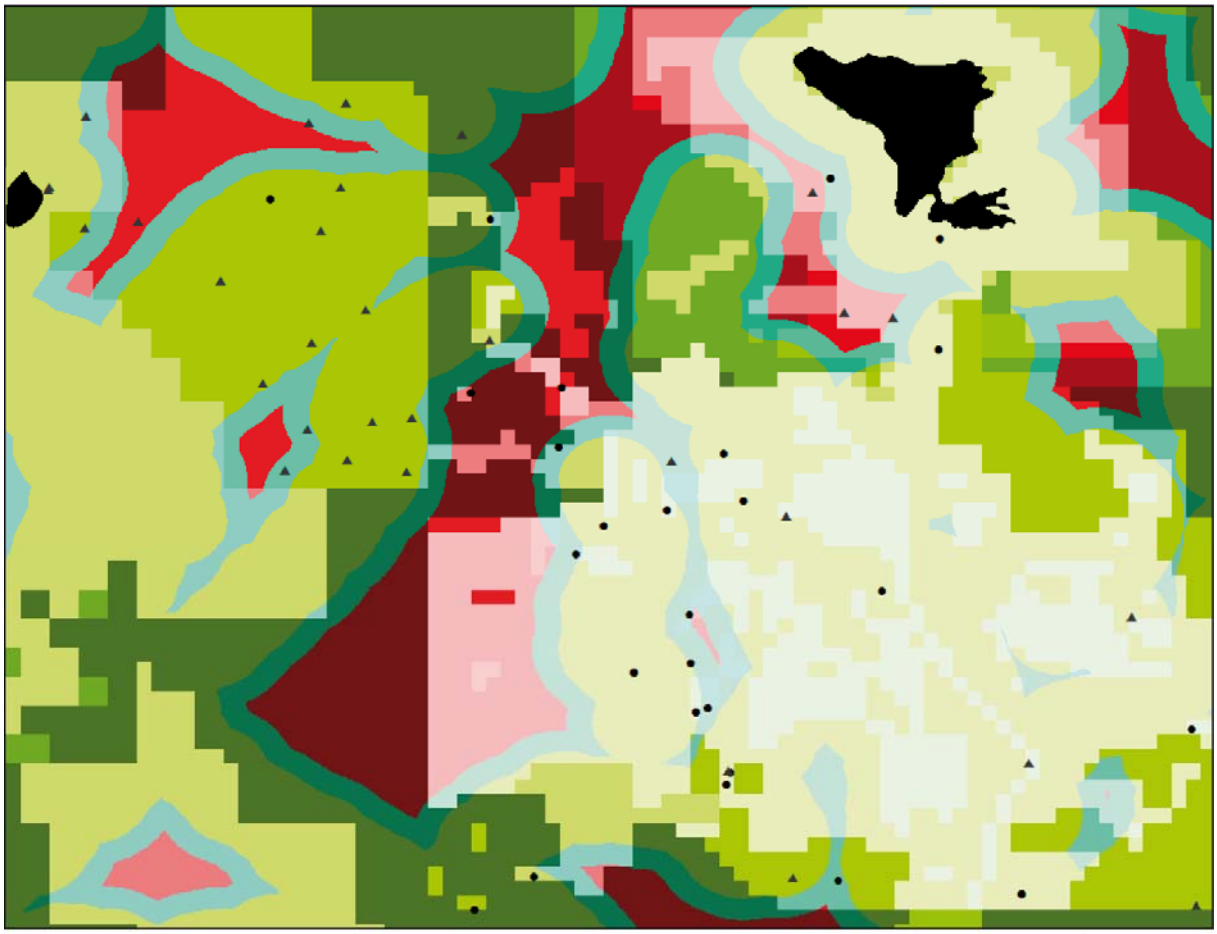
distance au cours d'eau	Possibilité de sites		Possibilité en %
3 km	Elevée	1	100
6 km	Elevée	1	100
9 km	Moyenne	1	100
12 km	Faible	1	100
15 km	Faible	1	100

Intensité de prospection de la zone

0 1 2 3 4 5



1A+1Ba - *Outliers* - Sous-ensembles flous de type 2



● Sites fiables

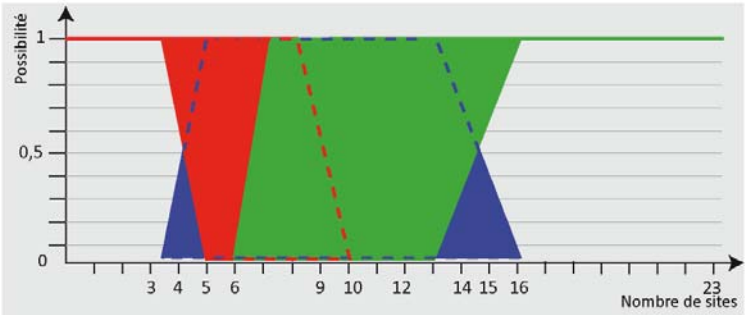
▲ Sites non fiables

10 km

distance au cours d'eau	Possibilité de sites	
3 km	Elevée	1
6 km	Elevée	1
9 km	Elevée	1
	Moyenne	1
12 km	Faible	1
15 km	Faible	1

Intensité de prospection de la zone

0 1 2 3 4 5



Bibliographie

- A -

AMMERMAN, A. J. (1981), "Surveys and Archaeological Research", *Annual Review of Anthropology,* n° 10, pp. 63-88.

ANSELIN, L. (1994), "Exploratory spatial data analysis and geographic information systems", in Painho, M. (ed.), *New tools for spatial analysis*, Luxembourg, Eurostat, pp. 45–54.

ANSELIN, L. (1995), "Local indicators of spatial association - LISA", *Geographical Analysis*, n°27, pp. 93-115.

ANSELIN, L. (1999), "Interactive techniques and exploratory spatial data analysis", in Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D., Rhind, D. (eds.), *Geographical Information Systems*, New York, Wiley, pp. 25-264.

ANSELIN, L. (2004), *GeoDa: an introduction to spatial data analysis*, Spatial Analysis Laboratory, Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois, Urbana-Champaign, 18 p.

ANSELIN, L. (2005), *Exploring spatial data with GeoDa: A workbook*, Spatial Analysis Laboratory, Department of Geography, University of Illinois, Urbana-Champaign, 226 p.

ANSELIN, L. (2009), *GeoDa 0.9 Unser's Guide*, Spatial Analysis Laboratory, Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois, Urbana-Champaign, 115 p.

ANTONI, J.-P., KLEIN, O, MOISY, S. (2004), « Cartographie interactive et multimédia : vers une aide à la réflexion géographique ». *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 288, mis en ligne le 21 octobre 2004. URL : http://cybergeo.revues.org/2621.

ARCHAEOMEDES (1998), *Des oppida aux métropoles, Archéologues et géographes en vallée du Rhône*, Paris : Anthropos, 280 p.

ARNAUD, A., DAVOINE, P.-A. (2009), « Approche cartographique et géovisualisation pour la représentation de l'incertitude : application à l'information dédiée aux risques naturels *», Revue Internationale de Géomatique,* vol. 21/2, pp. 205-224.

- B -

BANOS A. (2001), « A propos de l'analyse spatiale exploratoire des données ». *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 197, mis en ligne le 18 octobre 2001, consulté le 14 septembre 2015. URL : http://cybergeo.revues.org/4056 ; DOI : 10.4000/cybergeo.4056.

BANOS A. (2005), « La voie de l'étonnement : favoriser l'abduction dans les Systèmes d'Information Géographique », in Fotsing, J.-M. (dir.), *Apport des SIG à la recherche*, Presses Universitaires d'Orléans, pp. 237-254.

BANOS, A. (2013), *Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en SHS*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paris 1 Panthéon Sorbonne, 107 p.

BARCELÓ, J. A. (2009), *Computational intelligence in archaeology*, Information Science Reference, Hershey, New-York, 418 p.

BASSE R.M. (2010), « La LGV PACA dans l'évolution du système territorial transfrontalier franco-italo-monégasque », thèse en géographie, Université de Nice Sophia-Antipolis, 295 p.

BELL, M. L., HOBBS, B. F., ELLIS, H. (2003), «The use of multi-criteria decision-making methods in the integrated assessment of climate change: implications for IA practitioners». *Socio-Economic Planning Sciences*, n° 37, pp. 289-316.

BEVAN, A., CREMA, E.R., LI, X., PALMISANO, A. (2013), «Intensities, interactions and uncertainties: some new approaches to archaeological distributions», In Bevan, A., Lake, M. (eds.), *Computational Approaches to Archaeological Spaces*, Walnut Creek: Left Coast Press, pp. 27-52.

BOUCHON-MEUNIER, B., MARSALA, C., RIFQI, M. (2003), « Chapitre 1 » in Bouchon-Meunier, B., Marsala, C. (dir.), *Logique floue, principes, aide à la décision*, Hermès science, Lavoisier.

BOVEE, M., SRIVASTAVA, R. P., MAK, B. (2003), «A conceptual framework and belief-function approach to assessing overall information quality», *International Journal of Intelligent systems*, n° 18(1), pp. 51-74.

BLASS, E. (2003), «Researching the future: method or madness? », *Futures*, n°35, pp. 1041 – 1054.

BRADBURY, J. (2011), *Landscapes of Burial? The Homs Basalt, Syria in the 4th -3rd millennia BC,* Thèse d'archéologie, Durham University, 549 p.

BRAEMER F., GEYER B., DAVTIAN G. (2014), «Man/environment interactions in the Bronze Age Levant: Climatic crisis or fluctuations, chronology and settlement patterns in the Third Millennium Syrian arid steppe area villages», Actes du colloque de Rome, 3-4 décembre 2012, *The seven plagues. Catastrophes and destructions in Palestine and Egypt during the pre-classical period. Volcanic eruptions, earthquakes, floods, wars, famines and epidemics in the archaeological record and in Biblical and ancient Egyptian sources: an innovative approach*, ROSAPAT n°11, pp. 87-116.

BRAEMER F., GEYER B., DAVTIAN G. (2014), «From Site Catchment Analysis to Regional Settlement Pattern Analysis: Making a Regional Map of Environmental Resources' Potential. The Case of Arid Syria», *Proceedings of the 9e International Congress on the Archaeology of the Ancient Near East,* Basel, pp. 819-830.

BRAEMER, F., GAZAGNE, D., DAVTIAN, G. (2015), « Small-scale water systems in the Fertile Crescent. The role of cisterns-based water systems in an arid zone between rainfed agriculture and stockbreeding during Roman times», *Water History*, n° 7, Springer Netherlands, pp. 1-17. DOI 10.1007/s12685-015-0142-x.

BRAUDEL, F., COLIN, A. (1987), « Histoire et Sciences Sociales: La longue durée». *Réseaux,* n°27 (5), pp. 7-37.

BUCK, C. E. (2004), « Bayesian chronological data interpretation: where now ? », in Buck, C. E., Millard, A. R. (eds.), *Tools for constructing chronologies. Crossing disciplinary boundaries*, Lectures notes in statistics, vol. 177, Springer London, pp 1-24.

BURGUIERE, A. (dir.) (1986), *Dictionnaire des sciences historiques,* Paris, PUF, 694 p.

- C -

CASANOVA, L. (2010), « Les dynamiques du foncier à bâtir comme marqueurs du devenir des territoires de Provence intérieure, littorale et préalpine : éléments de prospective spatiale pour l'action territoriale », thèse en géographie, Université d'Avignon, 441 p.

CHEVRIER, B. (2012), « Ni espace ni temps en Préhistoire ancienne : «Out of Africa» ou le paradigme de la flèche », *Mappemonde*, n°106, 19 p.

CHEVRIER, B., KOEHLER, E. (2013), « Approche multiscalaire et Préhistoire : proposition pour un renouvellement de la vision géographique et culturelle du Paléolithique inférieur et moyen », GdR 3359 MoDyS - Rencontre jeunes chercheurs, 21-22 novembre 2013, Université de Franche-Comté, 15 p.

CHOUQUER, G. (2003), « Crise et recomposition des objets : les enjeux de l'archéogéographie », *Etudes rurales*, n°167-168 (3-4), pp. 13-31.

CLAVAL, P. (2002), « Découpage et effets de seuil en géographie », in Collectif, *Limites et discontinuités en géographie*, Paris, Sedes, pp 27-39.

CONOLLY, J., LAKE, M. (2006), *Geographical Information Systems in Archaeology*, Cambridge University Press, 338 p.

COPPENS, Y. (1983), *Le singe, l'Afrique et l'Homme*, Paris, Fayard, 156 .

CREMA, E. R. (2012), Modelling Temporal Uncertainty in Archaeological Analysis, *Journal of Archaeological Method and Theory*, n°19, pp. 440-461.

CREMA, E. R., BEVAN, A., LAKE, M. (2010), "A probabilistic framework for assessing spatio-temporal point patterns in the archaeological record", *Journal of Archaeological Science,* n° 37(5), pp. 1118-1130.

- D -

DAUPHINÉ A., VOIRON-CANICIO C. (1988), *Variogrammes et structures spatiales*, Montpellier : GIP RECLUS, n° 12, 56 p.

DAUPHINE, A. (2003), *Les théories de la complexité chez les géographes*, Economica Géographie, Broché, 248 p.

DEMENOCAL, P.B. (1995), "Plio-Pleistocene African Climate", *Science*, n°270 (5233), pp. 53-59.

DE RUNZ, C. (2008), « Imperfection, temps et espace : modélisation, analyse et visualisation dans un SIG archéologique », thèse en informatique, Université de Reims Champagne-Ardenne, 216 p.

DE RUNZ, C., DESJARDIN, E., PIANTONI, F., HERBIN, M. (2007) « Using fuzzy logic to manage uncertain multi-modal data in an archaeological GIS», *Proceedings of the 5th International Symposium on Spatial Data Quality*, pp. 114-119.

DESACHY, B. (2012), « Formaliser le raisonnement chronologique et son incertitude en archéologie de terrain », *Cybergeo : European Journal of Geography*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 597. DOI : 10.4000/cybergeo.25233.

DJAMENT-TRAN, G., GRATALOUP, C. (2010), « E pluribus urbibus una. Modéliser les trajectoires de villes », *Mappemonde* n°100 (2010.4), 13 p.

DUTOZIA, J. (2013), « Espaces à enjeux et effets de réseaux dans les systèmes de risques. Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Département du Var, Métropole de Marseille et Métropole de Barcelone », thèse en géographie, Université de Nice Sophia-Antipolis, 313 p.

DYKES, J. A., MACEACHREN, A. M., KRAAK, M.-J. (2005), *Exploring Geovisualization*, Amsterdam: Elsevier, 710 p.

- E -

ELIAS, N. (1996), *Du Temps*, Paris Fayard, 226 p.

ELISSALDE, B. (2000), « Géographie, temps et changement spatial », *L'Espace géographique*, n° 29 (3), pp. 224-236. doi : 10.3406/spgeo.2000.2008

EMSELLEM, K., LIZIARD, S., SCARELLA, F. (2012), « La géoprospective : l'émergence d'un nouveau champ de recherche ? », *L'Espace géographique*, n°41 (2), pp. 154-168.

EPPLER, M.J., WITTIG, D. (2000). «Conceptualizing Information Quality: A Review of Information Quality Frameworks from the Last Ten Years», P*roceedings of the 5e Conference on Information Quality*, pp. 83-96.

- F -

FARINETTI, E., HERMON, S., NICCOLUCCI, F. (2004), "Fuzzy logic application to artefact surface survey data", in Nicolucci, F., Hermon, S. (eds.), *Beyond the Artifact. Digital Interpretation of the Past*, Proceedings of CAA 2004, Prato 13–17 April 2004, Archaeolingua, Budapest, pp. 125-129.

FAVORY, F., NUNINGER, L. (dir.) (2008), *ArchaeDyn. Dynamique spatiale du peuplement et ressources naturelles : vers une analyse intégrée dans le long terme, de la Préhistoire au Moyen Age*, ArchaeDyn, Rapport d'activité scientifique 2005-2007, 71 p.

FAVORY, F., NUNINGER, L., SANDERS, L. (2012), « Intégration de concepts de géographie et d'archéologie spatiale pour l'étude des systèmes de peuplement », *L'Espace géographique*, n°41 (4), pp. 295-309.

FICHES J.-L., VAN DER LEEUW S. (1989), « De la structuration et de l'analyse spatiale aux processus historiques », *Archéologie et espaces*, Actes de la Xe rencontre d'archéologie et d'histoire d'Antibes, Juan-les-Pins Association pour la Promotion et la Diffusion des Connaissances Archéologiques (APCDA), CRA CNRS, pp. 503-512.

FINNE, M., HOLMGREN, K., SUNDQVIST, H.S., WEIBERG, E. ET LINDBLOM, M. (2011), «Climate in the eastern Mediterranean, and adjacent regions, during the past 6000 years-a review», *Journal of Archaeological Science*, n° 38, pp. 3153–3173.

FISHER, P. F. (2005), « Models of uncertainty in spatial data », in Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., Rhind, D.W. (eds.), *Geographical information systems. Principles, Techniques, Management and Applications*. Wiley, 2005, pp. 191-205.

FISHER, P. F., COMBER, A., WADSWORTH, R. (2006), "Approaches of uncertainty in spatial data", in Devillers, R., Jeansoulin, R. (Eds.), *Fundamentals of spatial data quality*, ISTE, London, UK., pp. 43-59.

FISHER, P. F., ARNOT, C. (2006), "Mapping type 2 change in fuzzy land cover", in Morris, A., Kokhan, S. (Eds.), *Geographic uncertainty in environmental security, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Fuzziness and Uncertainty in GIS for Environmental Security and Protection*, Kylv, Ukraine, Springer, The Netherlands, pp. 167-186.

FOURQUET, F. (1994), «L'espace-temps de la prospective», Les nouveaux territoires de la prospective, *Espaces et sociétés*, n°74-75, L'Harmattan, pp. 165-188.

FUSCO, J. (2015), « Detection of spatio-morphological structures on the basis of archaeological data with Mathematical Morphology and Variography. Application to archaeological sites», in Traviglia, A. (ed), *Across Space and Time*, Papers from the 41st Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Perth, 25-28 March 2013. Amsterdam University Press, Amsterdam, pp 249 – 260.

- G -

GACÔGNE, L. (2003), *Logique floue et applications*, Institut d'informatique d'entreprise d'Evry, 128 p. http://www.ensiie.fr/~gacogne/polyflou.pdf.

GALIATSATOS, N., WILKINSON, T., DONOGHUE, D. N. M., PHILIP, G. (2009) « The Fragile crescent Project (FCP): analysis of settlement landscapes using satellite imagery ». *Proceedings of the 37th Computer Applications in Archaeology 2009, Making history interactive*, Williamsburgh, Virginia, USA, 22-26 mars 2009.

GENTELLE, P. (1995), « Géographie et archéologie », in Bailly A., Ferras R., Pumain, D., (eds), *Encyclopédie de géographie*, Paris, Economica, pp. 203-215.

GERVAIS M., BEDARD Y., JEANSOULIN R., CERVELLE B. (2005), « Gestion de l'incertitude dans les bases de données géographiques: développement du modèle du producteur raisonnable », *Revue internationale de Géomatique*, vol. 10, pp. 1-31.

GEYER, B., ROUSSET, M.-O., AL-DBIYAT, M., AWAD, N., BARGE, O., BESANÇON, J., CALVET, Y., GATIER, P.-L., JAUBERT, R. (2005), «Les Marges Arides de la Syrie du Nord: première synthèse d'une prospection géoarchéologique», in *Annales Archéologiques Arabes Syriennes*, n°47-48, pp. 17-34.

GEYER, B., BESANÇON, J., ROUSSET, M.-O. (2006), « Les peuplements anciens », in Jaubert R., Geyer B. (eds), *Les marges arides du Croissant fertile. Peuplements, exploitation et contrôle des ressources en Syrie du Nord*, TMO 43, Maison de l'Orient, Lyon, pp. 55-69.

GLASER, B. (2012), « No preconception : the dictum », *Grounded Theory review*, vol. 11, n° 2, Sociology Press.

GODET, M. (1986), « Introduction to la prospective: seven key ideas and one scenario method », *Futures*, vol. 18, pp. 134-157.

GOODCHILD, M. F. (2006), «Foreword», in Devillers, R., Jeansoulin, R. (eds), *Fundamentals of spatial data quality,* ISTE, London, UK, 312 p.

GOURMELON F., HOUET T., VOIRON-CANICIOC., JOLIVEAU T. (2012), « La géoprospective, apport des approches spatiales à la prospective », *L'Espace géographique*, vol. 41, n°2, pp. 97-98.

GRATALOUP, C. (2003), « Les périodes de l'espace », *Espaces Temps : Continu/Discontinu. Puissances et impuissances d'un couple*, n° 82-83, pp. 80-86.

GRATALOUP, C. (1991), « Les régions du temps », in *Périodes. La construction du temps historique*, EHESS et Histoire au présent, pp. 157-173.

GUILLAUME, A. (1977), *Analyse des variables régionalisées*, DOIN – PARIS, 180 p.

GUILLAUME, S., CHARNOMORDIC, B. (2011), « Learning interpretable fuzzy inference systems with FisPro », *Information Sciences*, n° 181, pp. 4409-4427.

GUILLAUME, S., CHARNOMORDIC, B. (2013), "Systèmes d'inférence floue: collaboration expertise et données dans un environnement de modélisation intégrée à l'aide de FisPro", *Revue d'intelligence artificielle*, n°1, pp. 1-26.

- H -

HARALICK, R.M., STERNBERG, S.R., ZHUANG, X., (1987), «Image Analysis Using Mathematical Morphology», *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 532-550. doi: 10.1109/TPAMI.1987.4767941

HATZINIKOLAOU, E. G. (2006), "Quantitative methods in archaeological prediction: from binary to fuzzy logic», in Mehrer M. W., Wescott, K. L. (dir.), *GIS and Archaeological site location modelling*, CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 437 – 446.

HATZINIKOLAOU, E. G., HATZICHRISTOS, T., SIOLAS, A., MANTZOURANI, E. (2003), "Predicting archaeological site locations using GIS and fuzzy logic", in M. Doerr, A. Sarris (Eds.), *The digital heritage in archaeology. Computer applications and quantitative methods in archaeology 2002*, Archive of Monuments and Publications, Hellenic Ministry of Culture, Heraklion (Greece), pp. 169-178.

HERMON, S., NICCOLUCCI, F. (2002), "Estimating subjectivity of typologists and typological classification with fuzzy logic", *Archeologia e Calcolatori*, n° 13, pp. 217-232.

HERMON, S., NICCOLUCCI, F. (2003), "A fuzzy logic approach to typology in archaeological research", in M. Doerr, A. Sarris (Eds.), *The digital heritage in archaeology. Computer applications and quantitative methods in archaeology 2002*, Archive of Monuments and Publications, Hellenic Ministry of Culture, Heraklion (Greece), pp. 307-312.

HOUET, T., GOURMELON, F. (2014), « La géoprospective – Apport de la dimension spatiale aux démarches prospectives », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 667, mis en ligne le 08 février 2014. URL : http://cybergeo.revues.org/26194 ; DOI : 10.4000/cybergeo.26194.

HOWEY, M. C. L. (2007), «Using multi-criteria cost surface analysis to explore past regional landscapes: a case study of ritual activity and social interaction», *Journal of Archaeological Science* n° 34(11), pp. 1830-1846.

HUSI, P. (2001), « Quantification et datation en céramologie », *Les petits cahiers d'Anatole*, n°6, Laboratoire Archéologie et Territoires, Université de Tours, 27 p.

- J -

JOHNSON, I. (2004), «Aoristic Analysis: seeds of a new approach to mapping archaeological distributions through time», in Proceedings of the 31st Computer Applications in Archaeology, *Enter the Past. The E-way into the Four Dimensions of Cultural Heritage,* Oxford: Archaeopress, pp. 448-452.

- K -

KADDOURI L., RODIER X. (2013), « Modélisation des dynamiques spatiales », in *Variabilités environnementales, mutations sociales : natures, intensités, échelles et temporalités des changements*, Actes du 32e Colloque International d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes, CEPAM, pp.115-126.

KAMERMANS, H. (2006), « Problems in Paleolithic land evaluation : a cautionary tale », in Mehrer M. W., Wescott, K. L. (dir.), *GIS and Archaeological site location modelling*, CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 97 – 122.

KANIEWSKI D., PAULISSEN E., VAN CAMPO E., AL-MAQDISSI M., BRETSCHNEIDER J., VAN LERBERGHE K. (2008), «Middle East coastal ecosystem response to middle-to-late Holocene abrupt climate changes», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, n°105, pp. 13941–13946. doi: 10.1073/pnas.0803533105.

- L -

LAJOIE, G., MATHIAN, H. (1989), «Application of variograms in urban geography», in *Spatial Analysis and Population Dynamics*, Proceedings of the 6th European Colloquium of Theoretical and

Quantitative Geography, Chantilly, ed D. Pumain, London and Montrouge, John Libbey and INED, Congresses & Colloquia, pp. 295-310.

LANGLOIS, P. (2010), *Simulation des systèmes complexes en géographie*, Hermès Science, Lavoisier, 332 p.

LANOS, P., DUFRESNE, P. (2012), « Modélisation statistique bayésienne des données chronologiques », in De Beaune, S. A., Francfort, H.-P. (dir.), *L'Archéologie à découvert*, CNRS Editions, Paris, pp. 238-248.

LANOS P. (2010), « Modéliser la chronologie », in L'archéologie en mouvement : hommes, objets et temporalités, colloque 23-25 juin 2010, *CNRS, INSHS,* Paris, http://webcast.in2p3.fr/2010/archeomouv/index.php?video=lanos.ram.

LAWRENCE, D. (2012), *Early Urbanism in the Northern Fertile Crescent: A Comparison of Regional Settlement Trajectories and Millennial Landscape Change,* Thèse en archéologie, Durham University, 380 p.

LAWRENCE, D., BRADBURY, J. (2012), "Chronology, Uncertainty and GIS: A Methodology for Characterising and Understanding Landscapes of the Ancient Near East", in Bebermeier, W., Hebenstreit, R., Kaiser, E., Krause, J. (ed.), *Landscape Archaeology*, Proceedings of the International Conference in Berlin, 6th – 8th June 2012, special volume 3, pp. 1007-1037.

LEIBNIZ G. (1714), *Principes de la nature et de la grâce.* http://www.acnice.fr/philo/textes/Leibniz-Principes.htm.

LÉVI-STRAUSS, C. (1962), *La Pensée sauvage*, Pocket Agora, 347 p.

LITTON, C. D., BUCK, C. E. (1995), "The Bayesian approach to the interpretation of archaeological data", *Archaeometry*, n° 37(1), pp. 1-24.

LIZIARD, S. (2013), "Littoralisation de la façade nord-méditerranéenne: analyse spatiale et prospective dans le contexte du changement climatique", thèse en géographie, Université de Nice Sophia-Antipolis, 390 p.

LLOYD, C.D., ATKINSON, P.M. (2004), «Archaeology and geostatistics». *Journal of Archaeological Science*, n° 31 (2), pp. 151-165. doi:10.1016/j.jas.2003.07.004.

LOCK, G., HARRIS, T. (1997), «Analysing Change Through Time Within a Cultural Landscape: Conceptual and Functional Limitations of a GIS Approach», in Sinclair, P. (ed.) *Urban Origins in Eastern Africa,* World Archaeological Congress, One World series.

- M -

MACEACHREN, A.M., KRAAK, M.J. (2001), «Research Challenges in Geovisualization», *Cartography and Geographic Information Science*, n° 28, pp 3-12.

MALCZEWSKI, J. (1999), *GIS and Multicriteria Decision Analysis*, John Wiley and Sons, New York, 408 p.

MARKOFSKY, S., BEVAN, A. (2011), «Directional analysis of surface artifact distributions. A case study from the Murghab Delta, Turkmenistan», *Journal of Archaeological Science* n°39, pp. 428-439. doi: 10.1016/j.bbr.2011.03.031.

MARTIN, P. (2006), « La forme peut-elle libérer la prisonnière du carrefour ? Vers une théorie de la forme en géographie », Colloque *Géopoint 2004 : La forme en géographie*, Avignon, juin 2004. Groupe Dupont et UMR ESPACE 6012 (ed.), pp. 19-38.

MATHERON, G. (1963), "Principles of geostatistics", *Economic Geology*, n°58, pp. 1246-1266.

MATHERON, G. (1965), *La Théorie des variables régionalisées et ses applications*, Paris : Masson, 305 p.

MATHERON, G. (1967), *Eléments pour une théorie des milieux poreux*, Paris: Masson, 166 p.

MATHIAN, H., SANDERS, L. (2014), *Objets géographiques et processus de changement. Approches spatio-temporelles*, ISTE Editions, 178 p.

MAYEWSKI, P. A., ROHLING, E. E., STAGER, J. C., KARLEN, W., MAASCH, K. A., MEEKER, L. D., MEYERSON, E. A., GASSE, F., VAN KREVELD, S., HOLMGREN, K. (2004), «Holocene climate variability», *Quaternary Research*, n° 62, pp. 243 – 255.

MEHRER, M. W., WESCOTT, K. L. (eds) (2006), *GIS and Archaeological site location modeling*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 476 p.

MENDEL, J. M. (2004), "Fuzzy sets for words: why type-2 fuzzy sets should be used and how they can be used", presented as a two-hour tutorial at IEEE FUZZ, Budapest, Hungary.

MENDEL, J. M, BOB JOHN R. I. (2002), 'Type-2 fuzzy sets made simple", *IEEE Transactions on fuzzy systems*, vol. 10, n°2, pp. 117-127.

MIGOWSKI, C., STEIN, M., PRASAD, S., NEGENDANK, J.F.W., AGNON, A. (2006), «Holocene climate variability and cultural evolution in the Near East from the Dead Sea sedimentary record», *Quaternary Research,* n° 66, pp. 421–431.

MILO, D. S. (1991), *Trahir le temps (Histoire),* Paris, Les Belles Lettres. 270 p.

MILO, D. S. (1992), « Le siècle : projet expérimental avorté », in *Périodes : la construction du temps historique*, Actes du Ve colloque d'Histoire au présent, organisé par Dumoulin O. et Valéry, P. Paris, éditions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, pp. 123-128.

MORIN, E. (1974), « La complexité », Colloque sur les interrelations entre la Biologie, les Sciences sociales et la société, Paris, 18-22 mars 1974, Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture, 24 p.

MORIN, E. (1977), *La Méthode 1. La Nature de la Nature,* Paris : Seuil, Points Essais, 399 p.

MORIN, E. (1986), *La Méthode 3. La Connaissance de la Connaissance*, Paris : Seuil, Points Essais, 243 p.

MÜLLER, B. (1993), « Bibliothèque : Périodes, la construction du temps historique. Ve colloque d'Histoire au présent, organisé par O. Dumoulin et R. Valéry (1992) ; et Daniel S. Milo (1991), Trahir le temps (Histoire)» *Genèses,* vol. 12, n° 1, pp. 155-156.

- N -

NAUMANN, F., ROLKER, C. (2000), «Assessment Methods for Information Quality Criteria». *Proceedings of the International Conference on Information Quality*, pp. 148–162.

NAYLOR, J. C., SMITH, A. F. M. (1988), «An archaeological inference problem», *Journal of the American Statistical Association*, n° 83, pp. 588-595.

NICCOLUCCI, F., D'ANDREA, A., CRESCIOLI, M. (2001), «Archaeological Applications of Fuzzy Databases», in: Stančič, Z., T. Veljanovski (eds.), in *Computing Archaeology for Understanding the Past,* Proceedings of the 28th Computer Applications in Archaeology, Ljubljana, April 2000, Archaeopress, Oxford, pp. 107-116.

NICCOLUCCI, F., HERMON, S. (2004), "A fuzzy approach to reliability in archaeological virtual reconstruction", in: Nicolucci, F., Hermon S. (eds.), *Beyond the Artifact. Digital Interpretation of the Past,* Proceedings of Computer Applications in Archaeology (CAA 2004), Prato 13–17 April 2004. Archaeolingua, Budapest, pp. 28-35.

NICCOLUCCI, F., HERMON, S. (2015), "Time, Chronology and Classification", in Barceló, J. A., Bogdanovic, I. (eds.), *Mathematics and Archaeology*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, pp. 257 – 271.

- O -

OLIVEAU, S. (2010), "Autocorrélation spatiale: leçons du changement d'échelle", L'Espace Géographique, vol. 39, n°1, pp. 51-64.

ORTON, C. (2010), "Fit for purpose? Archaeological data in the 21st century", *Archeologia e Calcolatori* n°11, Edizioni All'Insegna del Giglio, pp. 249-260.

OSTIR, K., KOKALJ, Z., NUNINGER, L. (2008), «Confidence maps: a tool to evaluate data's relevance in spatial analysis», in *Tools and methods of Territorial Intelligence*, 6th International Conference of Territorial Intelligence, Oct 2008, Besançon, France. <halshs-00982906>.

OUZOULIAS, P. (2012), « Les campagnes Gallo-Romaines : quelle spatialité ? Retour sur l'expérience d'Archaeomedes », in Carpentier, V., Marcigny, C. (eds.), *Des hommes aux champs. Pour une archéologie des espaces ruraux du Néolithique au Moyen Âge*, Rennes, Presses universitaires de Rennes, pp. 131-156.

- P -

PEGUY, C. P. (1996), *L'horizontal et le vertical : le géographe entre le passé et le devenir de la planète.* Montpellier, Reclus, 176 p.

PHILIP, G., BRADBURY, J. (2010), « Pre-classical Activity in the Basalt Landscape of the Homs Region, Syria : Implications for the Development of « Sub-Optimal » Zones in the Levant during the Chalcolithic-Early Bronze Age", *Levant* n° 42, pp. 136-164.

PILLOT, L., SALIGNY, L. (2011), « L'évolution de l'occupation humaine : l'analyse spatiale exploratoire des données. Le problème de l'incertitude et de l'hétérogénéité des données en archéologie », in *Variabilités environnementales, mutations sociales Nature, intensités, échelles et temporalités*

des changements, Bertoncello, F. et Braemer, F. (eds.), Oct 2011, Antibes, France. Éditions APDCA, pp. 155-175.

PLOG, S., HANTMAN, J.L. (1990), «Chronology Construction and the Study of Prehistoric Cultural Change», *Journal of Field Archaeology,* n° 17(4), pp. 439-456.

PUMAIN, D. (1998), « La géographie saurait-elle inventer le futur ? », *Revue européenne des sciences sociales*, n°110 (36), pp. 53-69.

- R -

RACINE J.-B., RAFFESTIN C., RUFFY V. (1980), « Echelle et action, contributions à une interprétation du mécanisme de l'échelle dans la pratique de la géographie », *Geographica Helvetica*, vol. 35, n° 5, pp. 87-94.

RASSE, M. (2009), *« « Lucy in the sky »* … ou penser l'espace en millions d'années », *Cybergeo: European Journal of Geography*, n° 464.

RASSE, M. (2010), *Espaces et temps des premières sociétés. Pour une convergence Géographie – Préhistoire.* Habilitation à diriger des recherches, Université de Rouen, 225 p.

RATCLIFFE, J.H. (2000), «Aoristic analysis: the spatial interpretation of unspecified temporal events», *International Journal of Geographical Information Science,* n° 14 (7), pp. 669-679.

ROBERT, S. (2012), « Les dynamiques spatiales à la croisée de l'archéologie et de la géographie», *L'Espace géographique*, vol. 41, n°4, pp. 289-294.

RODIER, X., KADDOURI, L. (2012), « Modéliser les dynamiques spatiales en sciences humaines » in Bertoncello, F., Braemer, F. (eds), *XXXIIe rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes*, Oct 2011, Antibes, France. APDCA, pp.115-126.

ROHMER, J. (2013), *Recherches sur l'histoire et le peuplement du Hawran (Syrie du Sud) de l'Âge du fer à l'annexion romaine (XIIè s. av. J.-C. – Ier s. ap. J.-C.).* Thèse en archéologie, Université Paris 1 – Panthéon-Sorbonne, 747 p.

ROLLAND-MAY, C. (1984), « Notes sur les espaces géographiques flous », *Bulletin de l'Association des géographes français*, n°502-503, pp. 159-165.

ROLLAND-MAY, C. (1987), « La théorie des ensembles flous et son intérêt en géographie », *L'Espace géographique,* vol. 16, n°1, pp. 42-50.

ROLLAND-MAY, C. (1996), « Régionalisation d'espaces géographiques imprécis et incertains définis par des variables qualitatives », *Revue Géographique de l'Est,* vol. 36, n°3-4, pp. 213-241.

ROLLAND-MAY, C. (2003), « Limites, discontinuités, continu : le paradoxe du flou », *L'information géographique*, vol. 67, n°1, pp. 1-20. doi : 10.3406/ingeo.2003.2872

RONCAYOLO, M., CHESNEAU, I. (2011), *L'abécédaire de Marcel Roncayolo, introduction à une lecture de la ville. Entretiens avec Marcel Roncayolo*, InFolio, 607 p.

ROSEN, A. M. (2008), « Recensions », à propos de Kuzukuoglu, C., Marro, C. (ed.). 2007. *Sociétés humaines et changement climatique à la fin du troisième millénaire : une crise a-t-elle eu lieu en Haute Mésopotamie*? Actes du Colloque de Lyon, 5-8 déc. 2005. Paris : Institut français d'études anatoliennes d'Istanbul, diff. De Boccard (Varia Anatolica XIX). *Paléorient,* vol. 34, n°1, CNRS ÉDITIONS, pp. 199-213.

- S -

SAATY, T., L. (1990), *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory With the Analytic Hierarchy Process*, Analytic Hierarchy Process Series, vol. 6, RWS Publications, 477 p.

SAATY, T., L. (1990), "How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process", *European Journal of Operational Research,* n° 48, Elsevier Science Publishers B.V. North-Holland, pp 9-26.

SAATY, T., L. (1993), "What is relative measurement? The ratio scale phantom", *Mathematical and Computer Modelling*, n°17 (413), pp. l-12.

SAATY, T., L. (2008), "Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors, The Analytic Hierarchy/Network Process", *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales, Serie A, Matematicas,* n°102 (2), pp. 251–318.

SAMAL, A.R., SENGUPTA, R., FIFAREK, R. (2011), «Modeling spatial anisotropy of gold concentration data using GIS-based interpolated maps and variogram analysis: implications for structural control of mineralization», *Journal of Earth System Science,* n° 120 (4), pp. 583-59. doi: 10.1007/s12040-011-0091-4.

SCHACT, R. M. (1984), «The Contemporaneity Problem», *American Antiquity,* n° 49(4), pp. 678-695.

SCHWARZ, K. R., MOUNT, J. (2006), "Integrating spatial statistics into archaeological data modeling" in Mehrer M. W., Wescott, K. L. (dir.), *GIS and Archaeological site location modelling*, CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 163 – 190.

SERRA, J. (1982), *Image Analysis and Mathematical Morphology. Volume 1,* Image Analysis & Mathematical Morphology Series, London, Academic Press, 610 p.

STRAUSS A.L., CORBIN J. (1998), *Basics of Qualitative Research*, Thousand Oaks (Californie), Sage, 312 p.

- T -

TOBLER, W. (1970), "A computer movie simulating urban growth in the Detroit region", *Economic Geography*, vol. 46, n°2, pp. 324-240.

TRABOULSI, M. (2004), "Les précipitations au Proche-Orient: variabilité spatio-temporelle et relations avec la dynamique de l'atmosphère (1960-1961/1989-1990). Thèse de l'Université de Bourgogne, Dijon.

TRAUTH, M. H., LARRASOAÑA, J.-C., MUDELSEE, M. (2009), «Trends, rhythms and events in Plio-Pleistocene African climate», *Quaternary Science Reviews*, n°28, pp. 399-411.

- V -

VALERY, R., DUMOULIN, O. (1992), «Avant-Propos», in *Périodes : la construction du temps historique*, Actes du Ve colloque d'Histoire au présent, organisé par Dumoulin, O., Valery, P., Paris, éditions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, pp. 9-11.

VERHAGEN, J. (2006), «Quantifying the Qualified: the Use of Multicriteria Methods and Bayesian Statistics for the Development of Archaeological Predictive Models», in Mehrer M. W., Wescott, K. L. (dir.), *GIS and Archaeological site location modelling*, CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 191 – 216.

VERHAGEN, J. (2007), *Case studies in archaeological predictive modelling*, Thèse en archéologie, Amsterdam University Press – Archaeological Studies Leiden University Press, 224 p.

VOIRON-CANICIO, Ch. (1995), *Analyse spatiale et analyse d'images,* Montpellier, GIP Reclus, 190p.

VOIRON-CANICIO, Ch. (2006), « L'espace dans la modélisation des interactions nature-société », *Actes du colloque international «interactions Nature-Société, analyse et modèles»*, La Baule: UMR 6554 LETG, 3-6 mai 2006.

VOIRON-CANICIO, Ch. (2009), «Predicting the Urban Spread Using Spatio-Morphological Models », in Murgante, B., Borruso, G., Lapucci, A., Springer (eds), *Geocomputation and urban planning*, Studies in Computational Intelligence, pp. 223-236. doi: 10.1007/978-3-540-89930-3_13.

VOIRON-CANICIO Ch., DOVERI E., FUSCO J., (2011), « Spatial archaeology using image analysis and mathematical morphology, European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography (ECQTG) 2011, Athens, https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00778526.

VOIRON-CANICIO, Ch. (2012), « L'anticipation du changement en prospective et des changements spatiaux en géoprospective », *L'Espace Géographique*, vol. 41, n° 2, pp. 99-110.

VOLVEY, A., BRETAGNOLLE, A., DJAMENT, G., HOYAUX, A.-F., VRAC, M. (2005), *Echelles et temporalités*, Volvey, A. (dir.), Atlande - Clefs-concours Géographie, 238 p.

- W -

WEISS, H., BRADLEY, R. S. (2001), « What drives societal collapse? » *Science,* n°291, pp. 609-610.

WHITLEY, T. G. (2006), « Predictive modeling in a homogenous environment: an example from the Charleston Naval Weapons Station, South Carolina », in Mehrer M. W., Wescott, K. L. (dir.), *GIS and Archaeological site location modelling*, CRC Press, Taylor & Francis Group, pp. 355 – 391.

- Z -

ZADEH, L. A. (1965), « Fuzzy sets », *Information and control*, n°8, pp. 338-355.

ZADEH, L. A. (1978), « Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility", *Fuzzy sets and systems*, n°1, pp. 3-28.

ZANINETTI, J.-M. (2005), *Statistique spatiale, méthodes et applications géomatiques,* coll. Application des SIG, Hermès Science, Lavoisier, 320 p.

Table des figures

Figure 1 - Typologie de l'imperfection des données archéologiques (De Runz, 2008) 25
Figure 2 - Carte de confiance des artefacts datés de l'âge du bronze en France (Ostir et al., 2008) 28
Figure 3 - L'incertitude temporelle dans les répartitions de points (Le carré à gauche représente une répartition hypothétique de points avec, au-dessus, notre degré de connaissance temporelle sur les six points (A-F) sur cinq « time blocks » (t1-t5). Les barres grises horizontales représentent l'étendue temporelle de chaque point, montrant que le point D a une faible incertitude (il appartient uniquement au time block t1) et le point B a une incertitude plus élevée (le point est temporellement situé quelque part entre les « time blocks » t3 et t5). Les trois encadrés au centre montrent trois schémas temporels possibles (au centre) et spatio-temporels (à droite, pour les time blocks t1 et t2) (Bevan et al., 2013)). 36
Figure 4 - Concepts de « cône des futurs possibles » du système géographique complexe (à gauche) et de trajectoire « limitée » du système géographique complexe (à droite) (Rolland-May, 2003) 50
Figure 5 – Démarche adoptée dans cette thèse 61
Figure 6 – Carte des secteurs prospectés par les partenaires scientifiques du projet 66
Figure 7 - Impression écran du formulaire "sites" de la base de données PaléoSyr 68
Figure 8 - Frise chronologique de la base de données PaléoSyr, du Néolithique jusqu'à nos jours 71
Figure 9 - Zones pour lesquelles les cartes d'attractivité ont été élaborées (d'après Geyer et al., 2005) 74
Figure 10 - Répartition du peuplement et carte d' « attractivité » au Bronze Ancien IV (2450 - 2000 av. J.-C.)(Geyer et al., 2006). 75
Figure 11 - Carte d' « attractivité » de la zone du Leja (Braemer, Davtian, 2013) 76
Figure 12 - Carte d' « attractivité » de la zone du Leja, enrichie des aménagements hydrauliques et des sites de l'Âge du Bronze moyen (Braemer, Davtian, 2013) 77
Figure 13 - Potentiel agronomique des Marges Arides et du Leja 79
Figure 14 - Limites de l'expansion des populations sédentaires à différentes époques (Geyer et al. 2006) 81
Figure 15 - Niveaux d'intensité de la prospection archéologique en Syrie 82
Figure 16 - Critère n°1: des UNAR aux alternatives. 95
Figure 17 - Récapitulatif des premières étapes de l'AMC 100
Figure 18 - Résultats de la première application de l'AMC: sur la totalité de la base de données 103
Figure 19 - Carte de situation des zones comparées (d'après Geyer et al., 2005) 107
Figure 20 - Résultats de l'application n°2 de l'AMC: approche comparative entre les Marges Arides et la Syrie du Sud 108
Figure 21 – Synthèse des apports de la première étape des traitements 111
Figure 22 – Chaînage et objectifs des deux premières étapes de l'étude 114
Figure 23- Répartition des UNAR des périodes 1, 2 et 3 de manière aléatoire dans chaque intervalle de 100 ans. 115
Figure 24 - Répartition des UNAR de la sous-période 4 en fonction du nombre d'UNAR des périodes 1, 2 et 3. 116
Figure 25 - Répartition des UNAR dans les intervalles de 100 ans selon la méthode 2 117
Figure 26 - calcul des niveaux de gris des mailles selon la méthode 1 : a) indice de qualité de la datation de chaque UNAR b) somme des indices et niveau de gris de chaque cellule 119
Figure 27 - Exemple de chronologie d'une cellule d'1 km² 120

Figure 28 - Quantité d'information et niveau de fiabilité de la datation par mailles d'1 km² (ici agrandies pour la visualisation) pour l'intervalle temporel n°1 : méthodes 1 (en haut) et 2 (en bas) 123
Figure 29 – Variations spatio-temporelles de la quantité d'information par mailles d'1 km² (ici agrandies pour la visualisation) pour l'intervalle temporel n°1 : comparaison des méthodes 1 et 2 de répartition des UNAR 124
Figure 30 - De la construction à la communication visuelles (Antoni et al., 2003, d'après Cauvin (1996) et Dibiase (1990)) 126
Figure 31 - Un exemple d'artefact soulevé par la géovisualisation (méthode 1 de répartition des données) 127
Figure 32 - Comparaison des concentrations du peuplement observées avec la méthode 2, à la lumière des concentrations mises en évidence aux mêmes siècles par la méthode 1 128
Figure 33 - Un première approche des alignements de structures et des zones de concentration de l'information 129
Figure 34 – Synthèse des apports de la seconde étape des traitements 130
Figure 35 - Chaînage et objectifs des trois premières étapes de l'étude 133
Figure 36 – Illustration des transformations de base de morphologie mathématique (Voiron-Canicio, 1995) 135
Figure 37 - Comptage du nombre de connexités par dilatations successives 136
Figure 38 - Courbe du nombre de connexité du semis de sites compris dans l'intervalle temporel 1 (calculée à partir de la méthode 1 de répartition temporelle des sites). 136
Figure 39 - Courbes du nombre de connexités des semis de sites compris dans les intervalles temporels 12, 13, 19, 20 et 35 (méthode 1 de répartition temporelle des sites) 137
Figure 40 - Courbe représentant la distance moyenne entre les semis de points correspondant à chaque intervalle temporel étudié (méthode 1) 137
Figure 41 - Courbe représentant la distance moyenne entre les semis de points correspondant à chaque intervalle temporel étudié (méthode 2) 138
Figure 42 - Différents niveaux de configurations spatio-temporelles similaires (méthode 1) 139
Figure 43 - Différents niveaux de configurations spatio-temporelles similaires (méthode 2) 139
Figure 44 - Configurations spatio-temporelles similaires des méthodes 1 et 2 (les couleurs des «boîtes» illustrent les configurations similaires, indépendamment pour les méthodes 1 et 2) replacées sur la chronologie initiale de la base de données. 139
Figure 45 - Courbes des connexités de la première phase 1A identifiée sur la courbe des espacements moyens DM2 (Figure 43) 140
Figure 46 - Synthèse des opérations et des apports de la troisième étape des traitements 145
Figure 47 - Chaînage et objectifs des quatre premières étapes des traitements 146
Figure 48 - Le graphe perceptuel (Voiron-Canicio, 1995) 147
Figure 49 - Pas moyen de squelettisation pour chaque «région» identifiée, pour les méthodes 1 et 2. 148
Figure 50 - Résultats des algorithmes perceptuels: comparaison des intervalles temporels 1 à 6 de la méthode 2 149
Figure 51 - Typologie des profils de structures pour le niveau 1A 154
Figure 52 - Changements dans les profils de structures spatio-temporelles de la phase 1A à la phase 1B 155
Figure 53 - Synthèse des opérations et des apports de la quatrième étape des traitements 157
Figure 54 - Le jeu entre précision et fiabilité (Fusco, J. 2015) 158
Figure 55 - Chaînage et objectifs des cinq premières étapes de l'étude 159
Figure 56 - Préparation des images nécessaires à la squelettisation intégrant les niveaux de fiabilité de la prospection 161

Figure 57 - Enchaînement des squelettisations en fonction du niveau de fiabilité de la prospection pour le temps 1A 163
Figure 58 - Ajout de la dimension d'incertitude aux unités spatio-temporelles : les unités spatio-temporelles floues 164
Figure 59 - Configuration d'un espace géographique flou (Rolland-May, 1996) 165
Figure 60 - Zone étudiée dans la partie III 171
Figure 61 - Répartition des données au sein des temps sélectionnés pour l'étude. 175
Figure 62 - Les trois niveaux temporels matérialisés par les données 176
Figure 63 - Nombre de sites et leurs six niveaux de fiabilité par temps étudiés 177
Figure 64 - Nouvelle répartition des sites en deux classes de fiabilité, par temps étudiés. 178
Figure 65 - Passage de la carte initiale des niveaux d'intensité de la prospection archéologique, à des grilles aux mailles d'1 km et de 3 km de côté. 179
Figure 66 - Types de grilles à la base de la réalisation des variogrammes 181
Figure 67 - Les différents niveaux temporels, spatiaux et d'incertitude matérialisés dans le calcul des variogrammes 183
Figure 68 - Variogrammes directionnels pour le temps 1Ba à partir de la maille 1x1 km. 185
Figure 69 - Variogrammes directionnels pour le temps 1Bb à partir de la maille 1x1 km. 185
Figure 70 - Variogrammes directionnels pour le temps 1Ba à partir de la maille 3x3 km. 186
Figure 71 - Variogrammes directionnels pour le temps 1Bb à partir de la maille 3x3 km. 186
Figure 72 - Variogrammes directionnels pour le temps 1A+1Ba à partir de la maille 1x1 km. 187
Figure 73 - Variogrammes directionnels pour la totalité des sites à partir de la maille 1x1 km. 187
Figure 74 - Variogrammes directionnels pour le temps 1A+1Ba à partir de la maille 3x3 km. 188
Figure 75 - Variogrammes directionnels pour la totalité des sites à partir de la maille 3x3 km. 188
Figure 76 - Les types de processus spatio-temporels (Mathian, Sanders, 2014 ; d'après Claramunt, Thériault, 1995). 192
Figure 77 - Spatialisation des trajectoires temporelles des sites et de l'incertitude qui y est associée. 194
Figure 78 - Représentation schématique des principales configurations spatio-temporelles et d'incertitude relevées sur la figure précédente. 195
Figure 79 - Nombre de sites archéologiques par maille pour les temps 1Ba et 1A+1Ba. 197
Figure 80 - Nombre de sites archéologiques par maille pour les temps 1Bb et 1Ca. 198
Figure 81 - Représentation des mailles dont le nombre de sites augmente ou diminue entre les temps 1Ba et 1Bb. 199
Figure 82 - Représentation des mailles dont le nombre de sites augmente ou diminue entre les temps 1A+1Ba et 1Bb. 200
Figure 83 - Représentation des mailles dont le nombre de sites augmente ou diminue entre les temps 1Bb et 1Ca. 201
Figure 84 - Représentation des mailles dont le nombre de sites reste stable entre les temps 1Ba, 1Bb et 1Ca. 202
Figure 85 - Représentation des mailles dont le nombre de sites reste stable entre les temps 1A+1Ba, 1Bb et 1Ca. 203
Figure 86 - Différences dans l'observation des dynamiques du peuplement, causées par l'introduction d'un niveau temporel supplémentaire. 204
Figure 87 - Relations de voisinage définies par le "cas de la reine" 209
Figure 88 - Les divers types de LISA calculés 209
Figure 89 - Résultats des LISA univariés (réalisés sur le nombre de sites par maille pour chaque temps) et bivariés (réalisés entre les temps 1A+1Ba et 1Bb, et entre 1Ba et 1Bb). 211

Figure 90 - Résultats des LISA réalisés à partir des mailles dont la valeur augmente, diminue et reste stable, pour les sites fiables 212
Figure 91 - Résultats des LISA réalisés à partir des mailles dont la valeur augmente, diminue et reste stable, pour la totalité des sites 213
Figure 92 - Hétérogénéité statistique et hétérogénéité spatiale (Mathian, Sanders 2014) 214
Figure 93 - Extraction des mailles "high-high" et "high-low" des résultats des LISA 215
Figure 94 - Pourcentage du nombre de mailles représentées par le cluster "high-high" et l'outlier "high-low" pour les LISA calculés sur le nombre de sites par mailles pour chaque temps et chaque niveau de fiabilité. 216
Figure 95 - Pourcentage du nombre de mailles représentées par le cluster "high-high" et l'outlier "high-low" pour les LISA calculés sur le changement entre les temps 1Ba et 1Bb et 1A+1Ba et 1Bb, et par niveau de fiabilité. 217
Figure 96 - Identification des zones dites "peu ou pas prospectées" représentées sur les figures suivantes. 218
Figure 97 – Zones floues de stabilité à partir de deux niveaux temporels 220
Figure 98 - Zones floues d'apparition à partir de deux niveaux temporels 221
Figure 99 - Zones floues de disparition à partir de deux niveaux temporels 222
Figure 100 - Configuration d'un espace géographique flou (Rolland-May, 1996). 223
Figure 101 – Les hot-spots flous de changement ou de stabilité entre les temps 1Ba et 1Bb 224
Figure 102 - Les outliers flous de changement ou de stabilité entre les temps 1Ba et 1Bb 224
Figure 103 - Les hot-spots flous de changement ou de stabilité entre les temps 1A+1Ba et 1Bb 225
Figure 104 - Les outliers flous de changement ou de stabilité entre les temps 1A+1Ba et 1Bb 225
Figure 105 - Les divers niveaux d'information créés à cette étape du raisonnement. 227
Figure 106 – Chaîne de raisonnement suivie dans le chapitre 1 de la partie III. 229
Figure 107 - Fonction caractéristique de l'ensemble A (Bouchon-Meunier et al., 2003) 235
Figure 108 - Fonction d'appartenance de l'ensemble B pour la propriété avoisinant les 30 ans (Bouchon-Meunier et al., 2003) 236
Figure 109 – Exemple d'ensembles flous de la variable Température (Guillaume, Charnomordic, 2013) 236
Figure 110 - Comptage du nombre de sites par zone de 3 km autour des cours d'eau. 240
Figure 111 - Pourcentage du nombre de sites du temps 1Ba situés à des distances successives de 3 km des cours d'eau, pour chaque type d'occupation et niveau de fiabilité. 241
Figure 112 - Pourcentage du nombre de sites du temps 1A+1Ba situés à des distances successives de 3 km des cours d'eau, pour chaque type d'occupation et niveau de fiabilité. 241
Figure 113 - Pourcentage du nombre de sites du temps 1Bb situés à des distances successives de 3 km des cours d'eau, pour chaque type d'occupation et niveau de fiabilité. 242
Figure 114 - Pourcentage du nombre de sites apparaissant entre les temps 1Ba et 1Bb situés à des distances successives de 3 km des cours d'eau, pour chaque type d'occupation du sol et niveau de fiabilité. 243
Figure 115 - Pourcentage du nombre de sites demeurant stables entre les temps 1Ba et 1Bb situés à des distances successives de 3 km des cours d'eau, pour chaque type d'occupation du sol et niveau de fiabilité. 243
Figure 116 - Pourcentage du nombre de sites apparaissant entre les temps 1A+1Ba et 1Bb situés à des distances successives de 3 km des cours d'eau, pour chaque type d'occupation du sol et niveau de fiabilité. 244
Figure 117 - Pourcentage du nombre de sites demeurant stables entre les temps 1A+1Ba et 1Bb situés à des distances successives de 3 km des cours d'eau, pour chaque type d'occupation du sol et niveau de fiabilité. 244
Figure 118 - Squelettes des sites fiables aux pas 3 km et 4 km, pour le temps 1Ba 247

Figure 119 - Squelettes des sites fiables aux pas 3 km et 4 km, pour le temps 1A+1Ba 248
Figure 120 - Squelettes de la totalité des sites aux pas 3 km et 4 km, pour le temps 1Ba 249
Figure 121 - Squelettes de la totalité des sites aux pas 3 km et 4 km, pour le temps 1A+Ba 250
Figure 122 - Définition du cadre des sous-ensembles flous permettant d'évaluer si la quantité de sites est "faible", "moyenne" ou "élevée" par rapport à la moyenne. 252
Figure 123 - Sous-ensembles flous calculés à partir des sites fiables du temps 1Ba pour chaque type d'occupation. 255
Figure 124 - Le passage du flou de type 1 au flou de type 2 (Mendel, 2004). 256
Figure 125 - Passage des sous-ensembles flous de type 1 aux sous-ensembles flous de type 2. 258
Figure 126 - Possibilités de localisation des sites évaluées à partir des sous-ensembles flous de type 1 des sites hot-spot fiables du temps 1Ba. 260
Figure 127 - Possibilités de localisation des sites évaluées à partir des sous-ensembles flous de type 1 de la totalité des sites hot-spot du temps 1Ba. 261
Figure 128 - Possibilités de localisation des sites évaluées à partir des sous-ensembles flous de type 2 des sites hot-spot du temps 1Ba. 262
Figure 129 - Possibilités de localisation des sites évaluées à partir des sous-ensembles flous de type 1 des sites outliers fiables du temps 1Ba. 263
Figure 130 - Possibilités de localisation des sites évaluées à partir des sous-ensembles flous de type 1 de la totalité des sites outliers du temps 1Ba. 264
Figure 131 - Possibilités de localisation des sites évaluées à partir des sous-ensembles flous de type 2 des sites outliers du temps 1Ba. 265
Figure 132 - La chaîne de raisonnement développée dans la partie III. 271
Figure 133 - Raisonnement général de la thèse 274

Table des tableaux

Tableau 1 - La révolution des données massives (d'après Banos, 2013) 22
Tableau 2 - Types et causes d'erreurs qui sont sources d'incertitudes dans une base de données géographiques (De Runz, 2008, d'après Fischer, 2005) 24
Tableau 3 - Types et causes d'erreurs sources d'incertitudes dans une base de données spatiales contenant des objets archéologiques (De Runz, 2008) 24
Tableau 4 - Exemple de successions et de longueurs de phases (d'après Lawrence, 2012) 37
Tableau 5 - Extrait de la base de données PaléoSyr 70
Tableau 6 - Extrait de la table décrivant la chronologie des UNAR 70
Tableau 7 - Extrait de la table renseignant la morphologie des sites archéologiques 72
Tableau 8 - Groupes de potentiel agronomique à partir des 16 classes de qualité sols définies (Braemer et al., 2014) 78
Tableau 9 - Précision et fiabilité de l'information de la base de données PaléoSyr 89
Tableau 10 - Probabilités (en %) pour que chaque type d'UNAR soit représenté dans un site en fonction de la morphologie de ce dernier (Braemer, Fusco) 93
Tableau 11 - Indice attribué à chaque UNAR en fonction du degré de connaissance disponible sur sa morphologie 94
Tableau 12 - Calcul de la valeur représentant le critère n°1 pour chaque alternative 95
Tableau 13 - Indices de fiabilité de la datation des UNAR 96
Tableau 14 - Calcul de la valeur représentant le critère n°2 pour chaque alternative 96
Tableau 15 - Indices de fiabilité de la datation des UNAR 96
Tableau 16 - Calcul des valeurs du critère 4 pour chaque alternative 97
Tableau 17 – Synthèse : signification et procédure de création de chaque critère 98
Tableau 18 - Extrait de la matrice d'impacts 99
Tableau 19 - Matrice des points de vue 99
Tableau 20 - Données et méthodes utilisées pour chaque AMC 102
Tableau 21 - Passage des pourcentages de probabilité pour que l'UNAR témoigne d'une fonction d'habitat à six indices de fiabilité. 177
Tableau 22 - Les trajectoires temporelles des sites archéologiques et l'incertitude qui y est associée. 191
Tableau 23 - Logique de possibilités et de probabilités, l'exemple des oeufs au petit déjeunes (Dutozia, 2013 d'après Zadeh, 1978). 233
Tableau 24 - Coefficients de corrélation entre le nombre de sites correspondant à chaque type d'occupation et la distance aux cours d'eau. 245
Tableau 25 - Calcul du pourcentage de sites par rapport à la moyenne : l'exemple des sites fiables du temps 1Ba 253
Tableau 26 - Calcul des sous-ensembles flous à partir des sites fiables du temps 1Ba pour chaque type d'occupation. 253

Table des annexes

Annexe 1 - Courbes des connexités des UNAR pour chaque siècle (méthode 2 de répartition des UNAR dans le temps) regroupées par phase..... 280
Annexe 2 - Possibilités de localisation des sites évaluées à partir des sous-ensembles flous des temps 1A+1Ba..... 283

Table des matières

REMERCIEMENTS 5

RESUME 8

ABSTRACT 10

SOMMAIRE 12

INTRODUCTION GENERALE 15

PARTIE I - CONCEPTS ET METHODES POUR L'ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DES CONFIGURATIONS SPATIALES PASSEES EN CONTEXTE INCERTAIN 19

CHAPITRE 1 : QUELLE PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE EN ARCHEOLOGIE ? 21

INTRODUCTION *21*

1. QUANTITE ET FIABILITE DES DONNEES : DEUX DIMENSIONS A CONSIDERER 25

1.1 Des modèles exempts de pondération des données 25

1.2 Les « cartes de confiance » pour visualiser simultanément quantité et fiabilité des données 26

2. L'ELABORATION DE LA CHRONOLOGIE : INCERTITUDE OU CONFUSIONS METHODOLOGIQUES ? 28

2.1 Une information temporelle discontinue et incertaine 29

2.1.1 Datation relative : un décalage entre localisation spatiale et localisation temporelle des objets archéologiques *29*

2.1.2 La périodisation : un postulat conditionneur et implicite *32*

2.1.3 Une approche du changement artificielle et saccadée *33*

2.1.4 Conclusions sur la périodisation : un paradoxe oscillant entre instant et durée *34*

2.2 Méthodes avancées de traitement de l'incertitude en chronologie 35

2.2.1 Les démarches probabilistes d'élaboration de la chronologie et de ses niveaux d'incertitude *35*

2.2.2 Traitement de l'incertitude chronologique par la logique floue 38

2.3 Durée des phénomènes ou précision des données? 39

2.4 Incertitude ou question d'échelles ? 40

2.4.1 Résolution des données et échelles d'étude 40

2.4.2 Quand les modèles nient les échelles 41

CONCLUSION : Enjeux et questionnements majeurs dans l'étude des dynamiques spatio-temporelles des systèmes de peuplement passés. 43

CHAPITRE 2 : « FAIRE SCIENCE AVEC L'INCERTITUDE » : POUR UNE DEMARCHE FLEXIBLE ET EXPLORATOIRE S'INSPIRANT DU CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE DE LA GEOPROSPECTIVE. 46

INTRODUCTION 46

1. PROJETER DANS LE PASSE LE CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE DE LA GEOPROSPECTIVE. 47

1.1 L'espace, au cœur de la démarche 47

1.2 Retracer le passé et anticiper l'avenir : des incertitudes à rapprocher ? 48

1.3 Des « futurs possibles » aux « passés possibles » 49

2. AU CROISEMENT DE LA DIMENSION SPATIALE ET DE L'INCERTITUDE : UNE DEMARCHE EXPERIMENTALE ET EXPLORATOIRE 51

2.1 Rester ouvert à l'émergence : l'Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) 51

2.2 Tirer parti de la diversité, plutôt que niveler par le bas 52

2.3 « Déconstruire les représentations que véhiculent les catégories » (Roncayolo, Chesneau, 2011) pour une étude du changement spatial. 53

2.4 Un chaînage de méthodes et de techniques 55

2.4.1 Les géostatistiques et les statistiques spatiales: une prise en compte de la singularité et de la discontinuité 56

2.4.2 Aborder les phénomènes par la forme : l'analyse d'images par morphologie mathématique 57

2.4.3 Spécificités et avantages d'une utilisation conjointe des géostatistiques et de la morphologie mathématique en archéologie 58

2.4.4 La théorie des possibilités et les ensembles flous 59

CONCLUSION : POSITIONNEMENT DE LA RECHERCHE 60

CHAPITRE 3 : CONTEXTE DE LA RECHERCHE 63

INTRODUCTION 63

1. PRESENTATION ET OBJECTIFS GENERAUX DU PROGRAMME PALEOSYR **63**

1.1 Objectifs du programme **63**

1.2 Les zones géographiques étudiées dans le programme PaléoSyr **64**

2. PRESENTATION DE LA BASE DE DONNEES ET DES QUESTIONNEMENTS QU'ELLE SOULEVE **66**

2.1 Conception de la base de données **67**

2.2 Description des données utilisées et de leurs attributs **68**

3. LES MODELES SPATIO-TEMPORELS ELABORES AU COURS DU PROGRAMME PALEOSYR **73**

3.1 Homogénéisation de la chronologie **73**

3.2 Les cartes « d'attractivité » **74**

3.3 Quantification du potentiel agro-pastoral par l'imagerie satellite **77**

3.4 Les fluctuations de l'occupation du sol au cours du temps: confrontation de la Syrie du Sud et des Marges Arides **79**

CONCLUSION ***83***

PARTIE II - CONCEPTION ET APPLICATION D'UNE METHODOLOGIE D'EVALUATION DE LA QUALITE SPATIO-TEMPORELLE DES DONNEES DANS LA LONGUE DUREE. **86**

CHAPITRE 4 : ADAPTATION D'UNE METHODE D'AIDE A LA DECISION POUR EVALUER LES VARIATIONS DE LA QUALITE DE L'INFORMATION SELON LES PERIODES ETUDIEES. **87**

INTRODUCTION ***87***

1. LA QUALITE DE L'INFORMATION : UN CONCEPT AUX MULTIPLES FACETTES **88**

2. LE CHOIX D'UNE UNITE TEMPORELLE DE REFERENCE : LE SIECLE **89**

3. ADAPTATION D'UNE METHODE D'AIDE A LA DECISION : L'ANALYSE MULTICRITERE **90**

3.1 Etat de l'art et présentation générale de la méthode **90**

3.2 Déroulement de la procédure d'analyse multicritère **91**

3.2.1 Etape 1: définir les objectifs *91*

3.2.2 Etape 2: identifier les alternatives *91*

3.2.3 Etape 3: définir et quantifier les critères *92*

3.2.4 Etape 4: définir les points de vue et les poids des critères 98

3.2.5 Etape 5: calcul et hiérarchisation des scores de chaque alternative 100

4. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS 101

4.1 Application n°1 de l'AMC : à la base de données entière, depuis le début du Néolithique jusqu'à aujourd'hui 101

4.2 Application n°2 de l'AMC : approche comparative entre les données des Marges Arides, et celles de la Syrie du Sud. 107

CONCLUSION 110

CHAPITRE 5: REPARTITION SPATIO-TEMPORELLE DES DONNEES ET DE LA QUALITE DE L'INFORMATION ; L'APPORT DE LA GEOVISUALISATION 113

INTRODUCTION 113

1. REPARTITION SPATIO-TEMPORELLE DES UNAR 114

1.1 Méthode 1 : Répartition aléatoire des UNAR dans chaque intervalle de 100 ans. 115

1.2 Méthode 2 : Répartition cumulative des UNAR dans chaque intervalle de 100 ans 116

2. REPRESENTER LES VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DE LA QUALITE DE L'INFORMATION 118

2.1 Choix de la résolution du maillage 118

2.2 Calcul du niveau de fiabilité temporelle pour la méthode 1 de répartition des UNAR 119

2.3 Calcul du niveau de fiabilité temporelle pour la méthode 2 de répartition des UNAR 120

3. PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS 121

3.1 Présentation des cartes réalisées 121

3.2 Une cartographie « réflexive » et exploratoire : l'apport de la géovisualisation... 124

CONCLUSION : discussion sur la méthode et les résultats 126

CHAPITRE 6 : EXPLORATION ET IDENTIFICATION DES « UNITES SPATIO-TEMPORELLES SIGNIFICATIVES » ; METHODE D'ANALYSE SPATIO-MORPHOLOGIQUE EXPLORATOIRE. 132

INTRODUCTION 132

1. LIMITES ET DISCONTINUITES SPATIO-TEMPORELLES 133

2. MESURE DE LA DISTRIBUTION PAR LE NOMBRE DE CONNEXITES 135

2.1 Elaboration des courbes de connexités 135

2.2 Mise en évidence des organisations spatio-temporelles récurrentes par les courbes de connexités 136

2.3 Calcul de la courbe des distances moyennes entre les UNAR 137

3. MISE EN EVIDENCE DES DIFFERENTS NIVEAUX DE CONFIGURATIONS SPATIO-TEMPORELLES 138

4. VISUALISATION DES DISTRIBUTIONS ET DE LEURS STRUCTURES SPATIO-TEMPORELLES 146

5. IDENTIFICATION DE LA MORPHOLOGIE DES STRUCTURES SPATIO-TEMPORELLES : LES UNITES SPATIO-TEMPORELLES ELEMENTAIRES 152

5.1 Typologie des profils de structures spatiales détectées : ancrage spatio-temporel des structures 152

5.2 Interprétation et synthèse des résultats obtenus 156

6. APPORT D'UNE PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE DANS LA DETECTION DES STRUCTURES SPATIO-TEMPORELLES : PROCEDURE D'ANALYSE SPATIO-MORPHOLOGIQUE EN CONTEXTE INCERTAIN 159

CONCLUSION 165

PARTIE III – « LES PASSES POSSIBLES » : DE L'EXPLORATION A LA MODELISATION FLOUE DES CONFIGURATIONS SPATIALES ET DU PEUPLEMENT POSSIBLES 168

CHAPITRE 7 : REGIONALISATION FLOUE DES CONFIGURATIONS SPATIALES DU PEUPLEMENT ET DE LEUR DYNAMIQUE TEMPORELLE 170

INTRODUCTION 170

1. CARACTERISTIQUES DE LA ZONE ETUDIEE 170

1.1 Choix de la région spatio-temporelle d'étude 170

1.2 Objectifs et moyens 172

2. LA RECHERCHE EXPLORATOIRE DES MODES ET DYNAMIQUES D'OCCUPATION DU SOL 180

2.1 Détection des grandes structures spatio-temporelles par la variographie 180

2.1.1 Rappel sur la détection des structures spatiales par la variographie 180

2.1.2 Mode de réalisation des variogrammes 180

2.1.3 Interprétation des résultats 183

2.2 Observation spatiale des indications données par les variogrammes 190

2.2.1 Diverses configurations de trajectoires spatio-temporelles et incertitude à l'échelle du site 190

2.2.2 Observation des structures spatio-temporelles à l'échelle de la maille de 3x3 km 196

2.3 Identifier les structures spatio-temporelles de l'occupation du sol et de son changement homogènes par le calcul des LISA (Local Indicators of Spatial Association). 205

2.3.1 Le choix de l'indice local de Moran 205

2.3.2 Paramétrage du calcul des LISA 207

2.3.3 Mise en évidence des structures spatio-temporelles du changement par les LISA 209

2.3.4 Régionalisation floue des différentes configurations spatio-temporelles du changement 219

CONCLUSION 228

CHAPITRE 8 : EVALUATION ET MODELISATION DES POSSIBILITES D'OCCUPATION DU SOL DANS UN CONTEXTE D'INCERTITUDE FORTE. .. 231

INTRODUCTION 231

1. METHODE D'APPREHENSION DE L'INCERTITUDE FORTE PAR LA THEORIE DES POSSIBILITES 231

1.1 Quels niveaux d'information conserver dans la recherche des logiques d'occupation du sol? 231

1.2 Le choix de la logique floue pour la modélisation de connaissances incertaines 232

1.2.1 Logique floue et possibilités versus probabilités : quel cadre théorique choisir ? 232

1.2.2 Définition d'un sous-ensemble flou 234

1.3 Le choix d'une démarche empirique et exploratoire 236

2. LES LOGIQUES D'OCCUPATION DU SOL : TEST DES PARAMETRES A INTEGRER 238

2.1 Préparation des données 238

2.1.1 Les données relatives aux sites 238

2.1.2 Les données relatives aux critères à tester 238

2.2 Test de la corrélation entre la distance au cours d'eau et le nombre de sites par des méthodes statistiques 239

2.3 Test par des méthodes morphologiques 246

3. PASSAGE DE L'OBSERVATION A L'ESTIMATION DE L'OCCUPATION DU SOL DANS UNE LOGIQUE POSSIBILISTE 251

3.1 Définition du cadre des sous-ensembles flous de type 1 251

3.2 Définition du cadre des sous-ensembles flous de type 2 256

3.1 Cartographie des résultats 259

CONCLUSION : discussion sur la méthode et les résultats 267

CONCLUSION GENERALE **273**

ANNEXES **280**

BIBLIOGRAPHIE **290**

TABLE DES FIGURES **308**

TABLE DES TABLEAUX **313**

TABLE DES ANNEXES **314**

TABLE DES MATIERES **315**