

# 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).

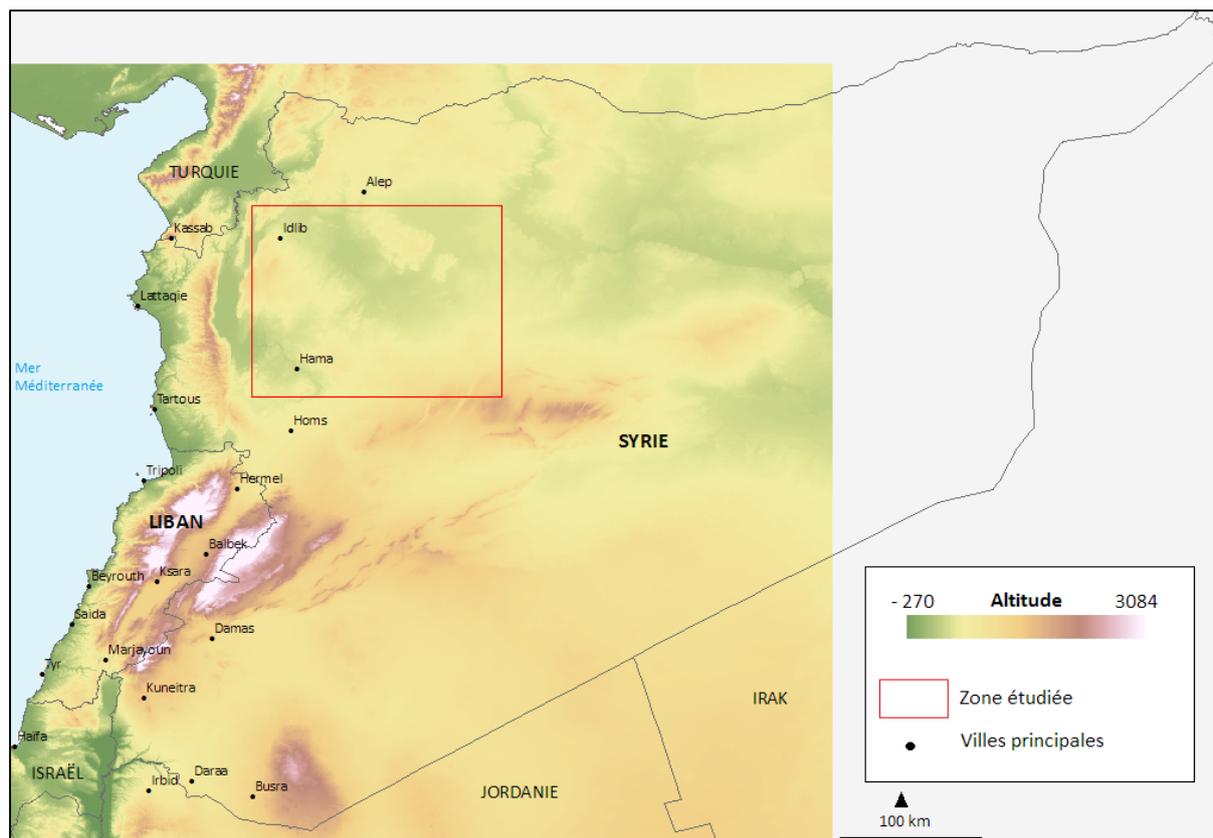


Figure 60 - Zone étudiée dans la partie III

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 (fiabiles et non fiabiles 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.

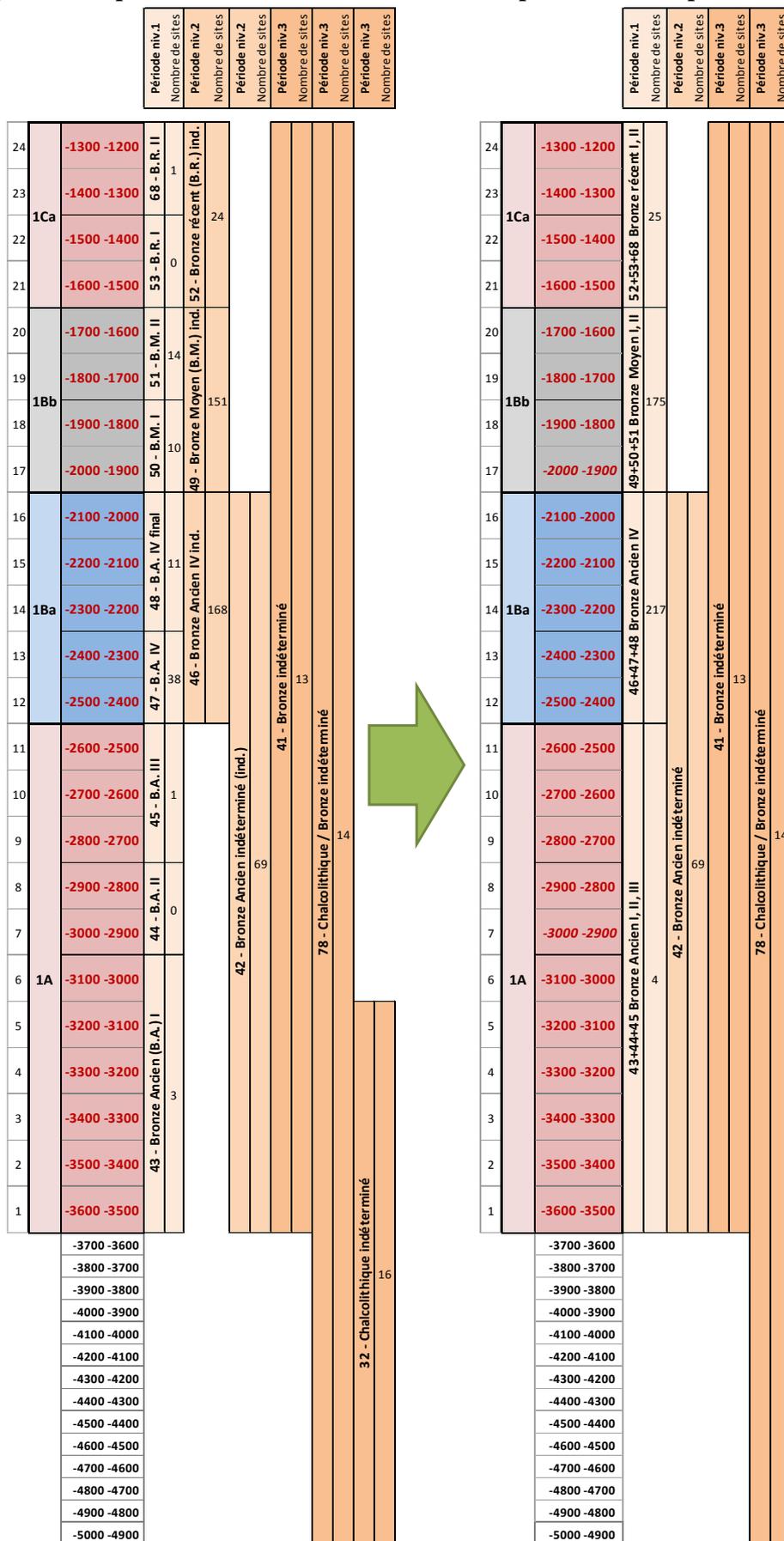
On constate une répartition fort inégale des sites. Mais surtout, un niveau de précision certes élevé mais bien peu renseigné : les sous-périodes les plus précises contiennent bien moins de sites que les niveaux de sous-périodes plus englobants. Dans un but purement technique (la plupart des sous-périodes 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.

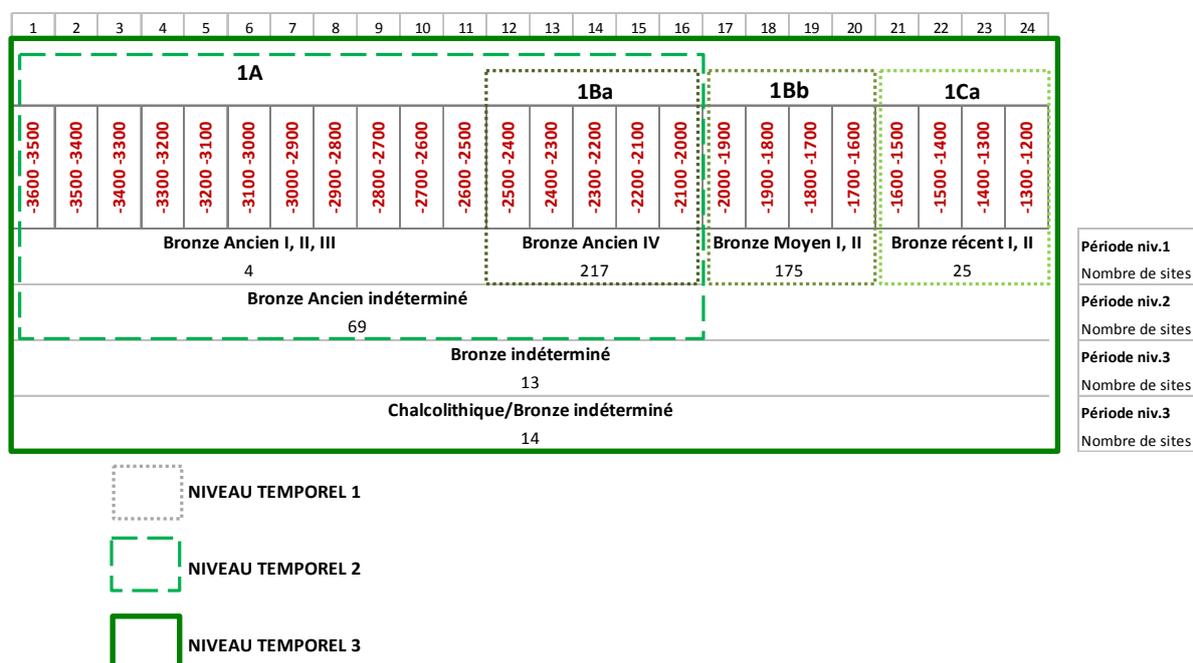


Figure 62 - Les trois niveaux temporels matérialisés par les données

⇒ **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) :

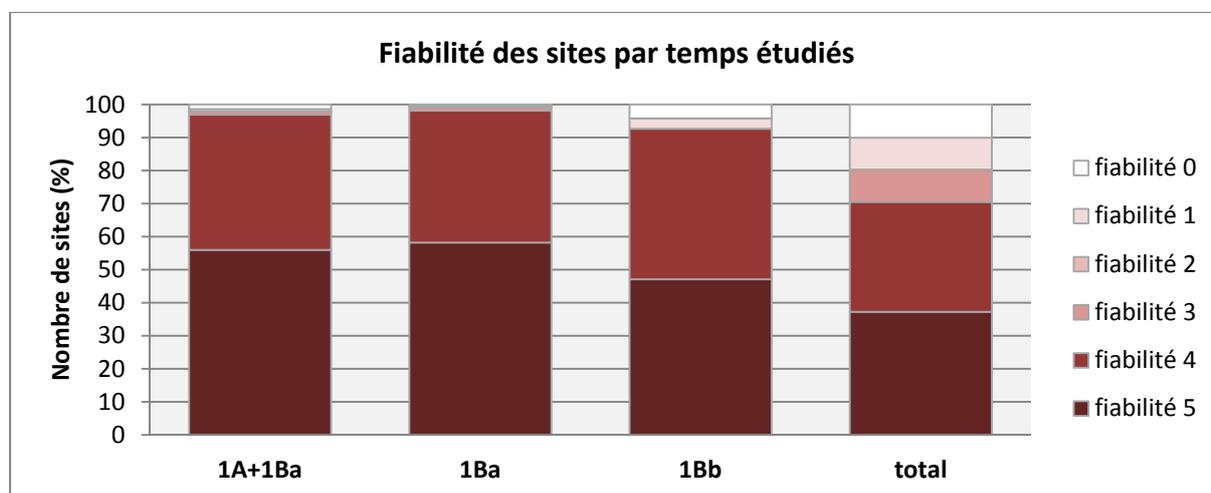


Figure 63 - Nombre de sites et leurs six niveaux de fiabilité par *temps* étudiés

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).

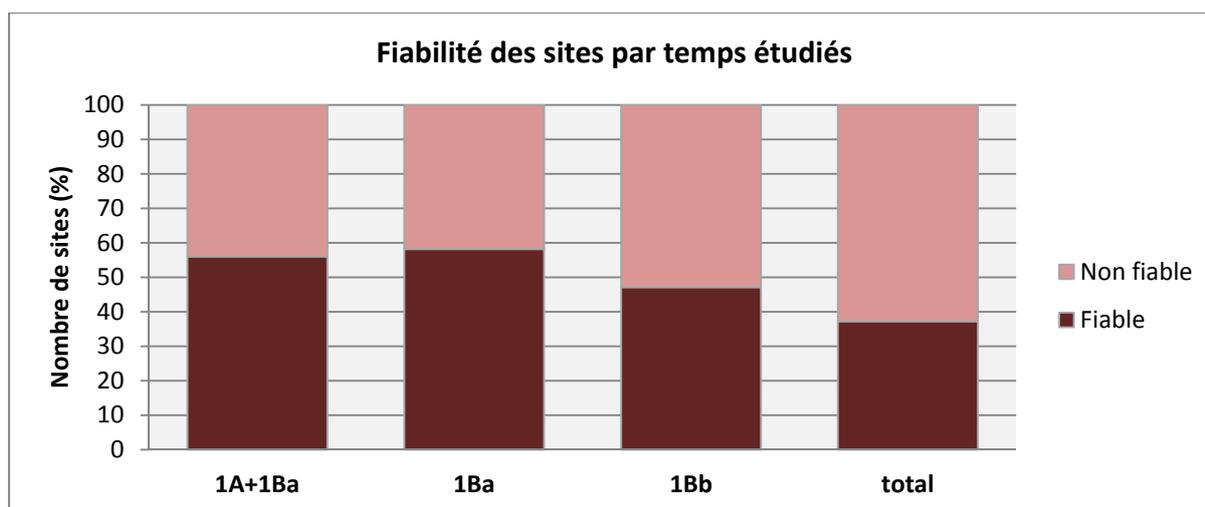


Figure 64 - Nouvelle répartition des sites en deux classes de fiabilité, par *temps* étudiés.

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.

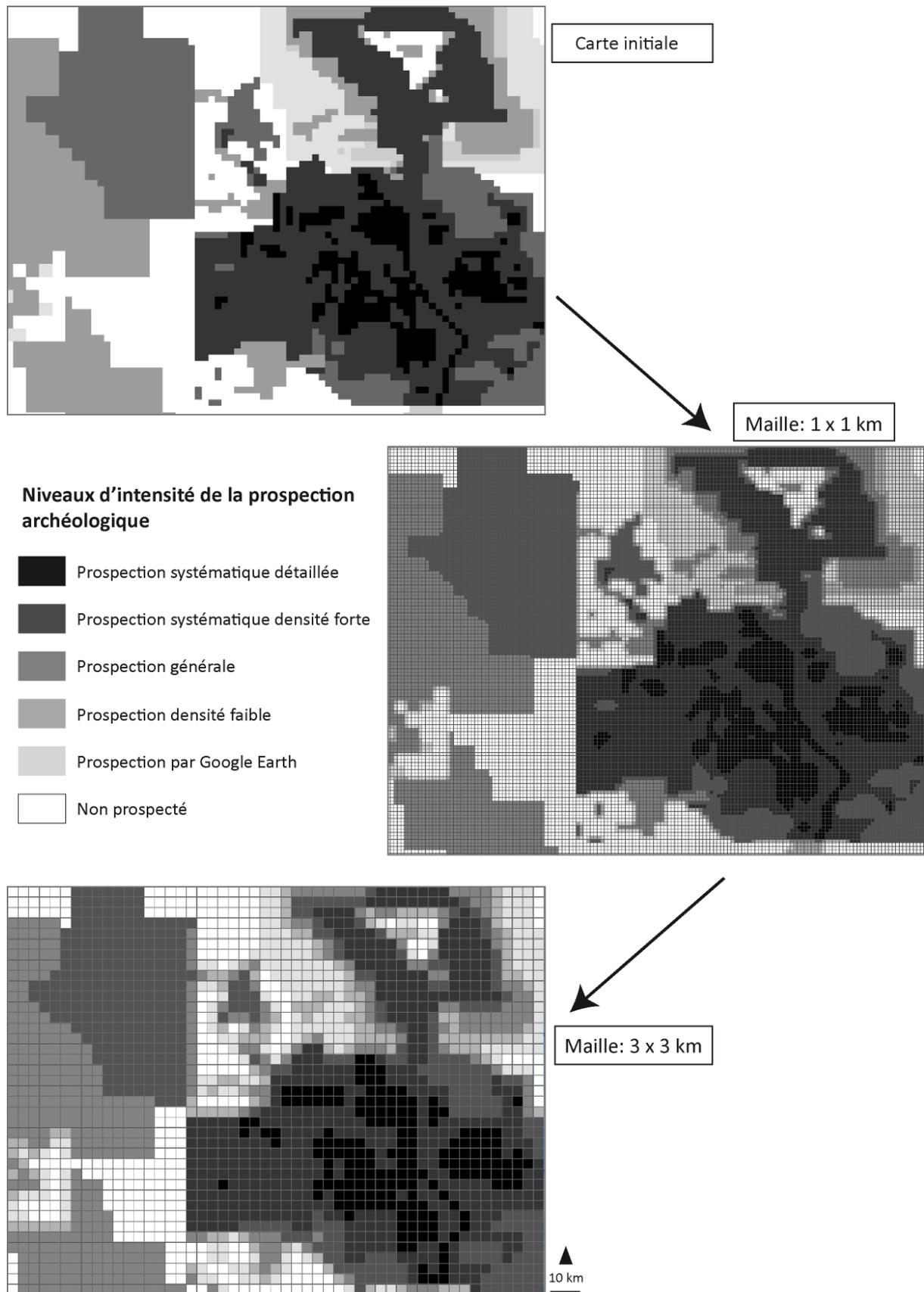


Figure 65 - Passage de la carte initiale des niveaux d'intensité de la prospection archéologique, à des grilles aux mailles d'1 km et de 3 km de côté.

## 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  $2\gamma(h)$  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).

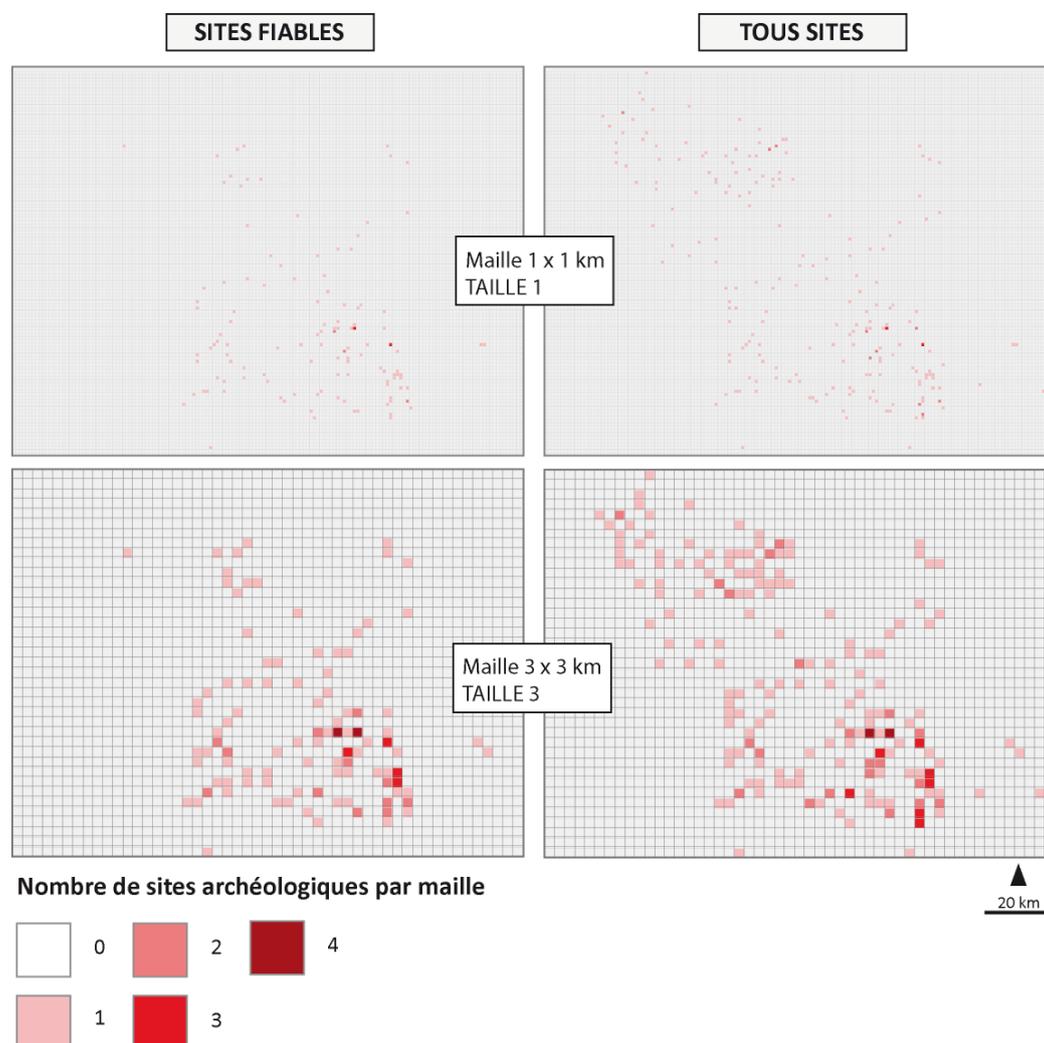


Figure 66 - Types de grilles à la base de la réalisation des variogrammes

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 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.

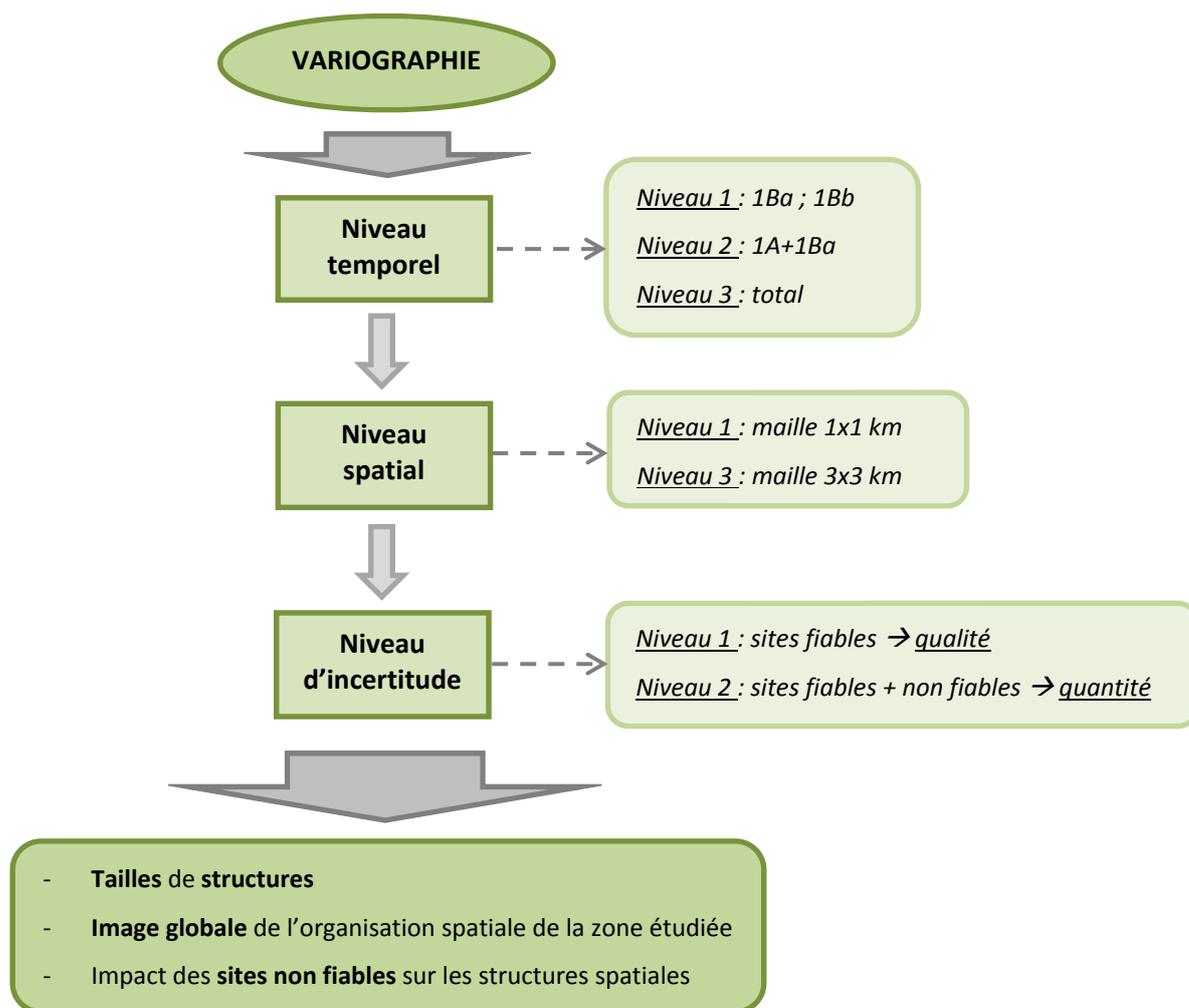


Figure 67 - Les différents niveaux temporels, spatiaux et d'incertitude matérialisés dans le calcul des variogrammes

### 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 km<sup>2</sup> à 9 km<sup>2</sup>), 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.

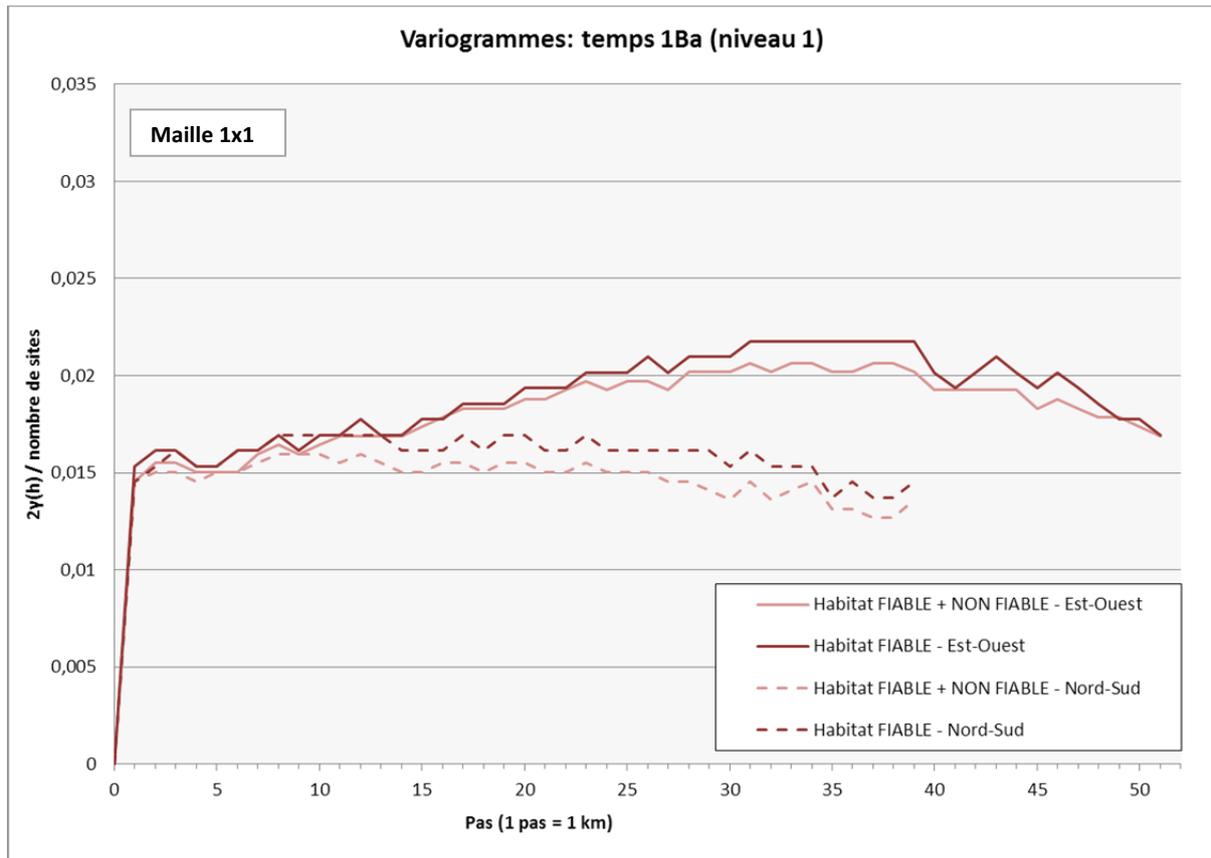


Figure 68 - Variogrammes directionnels pour le *temps 1Ba* à partir de la maille 1x1 km.

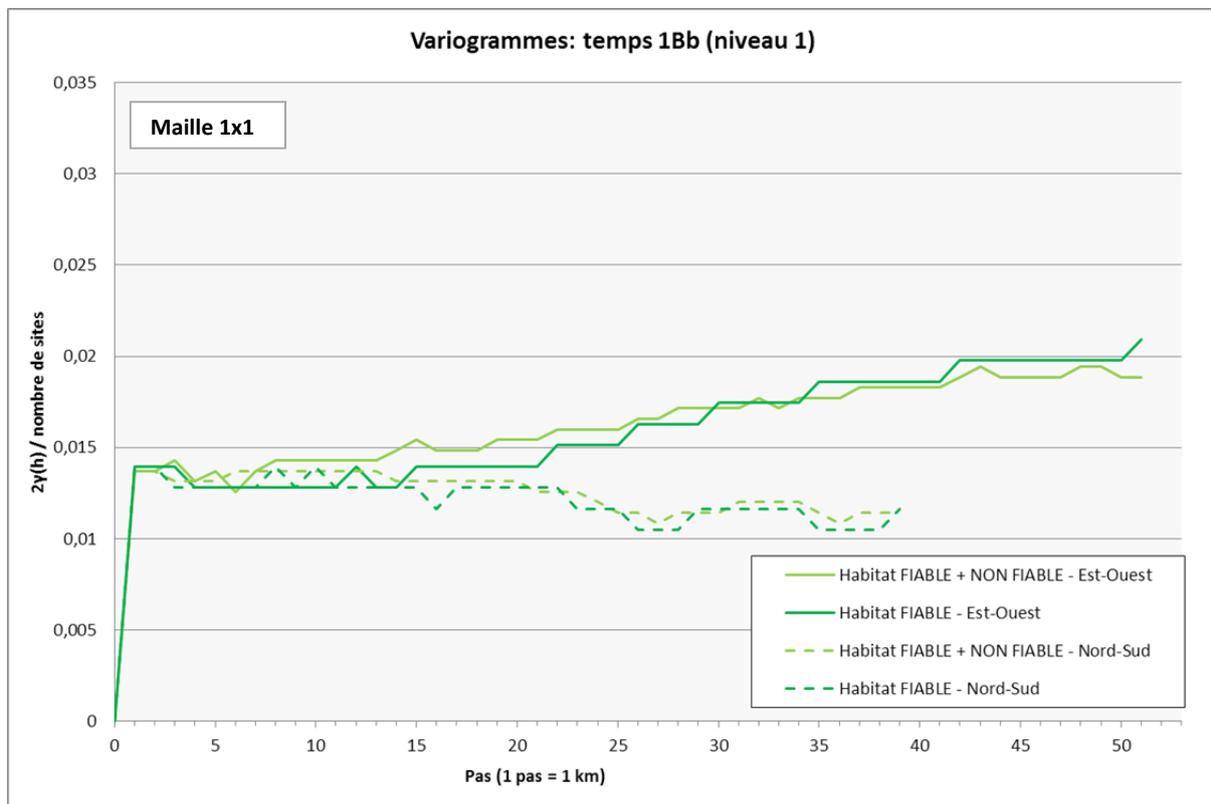


Figure 69 - Variogrammes directionnels pour le *temps 1Bb* à partir de la maille 1x1 km.

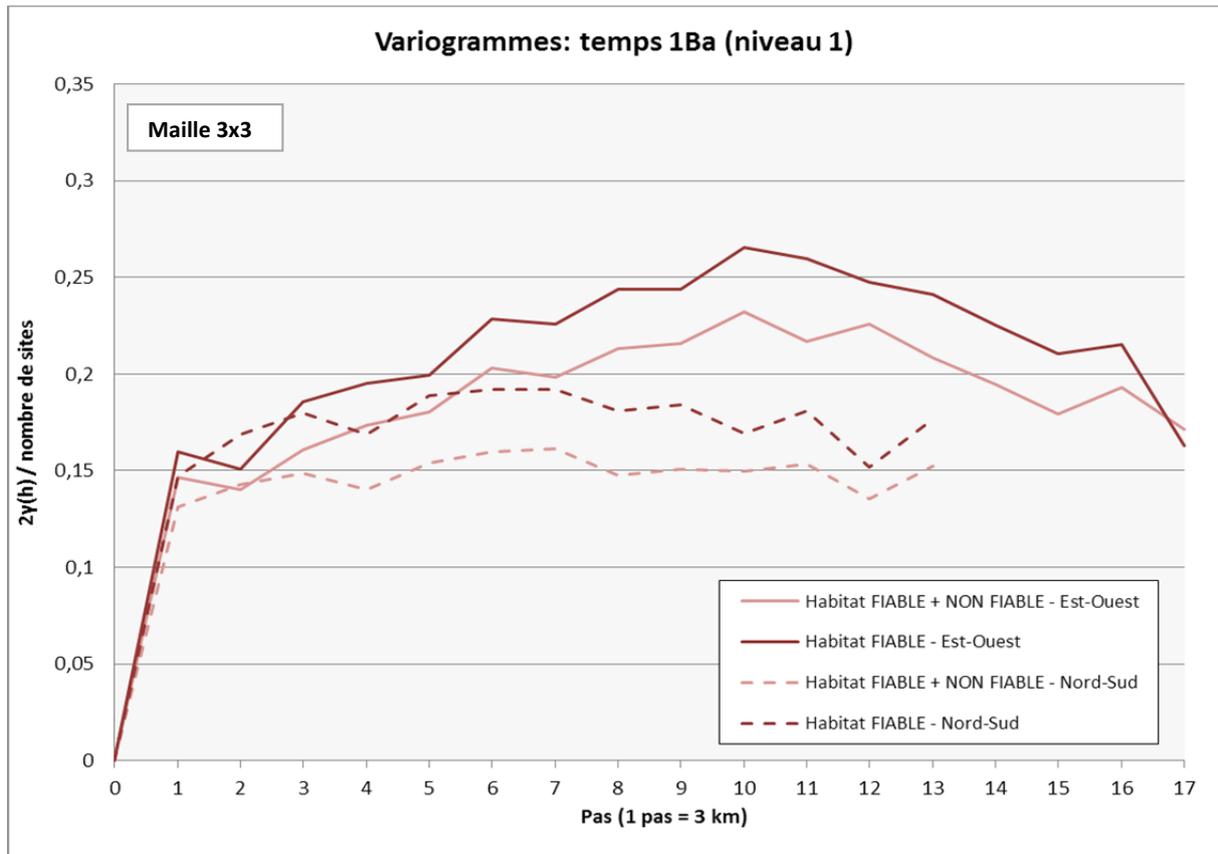


Figure 70 - Variogrammes directionnels pour le temps 1Ba à partir de la maille 3x3 km.

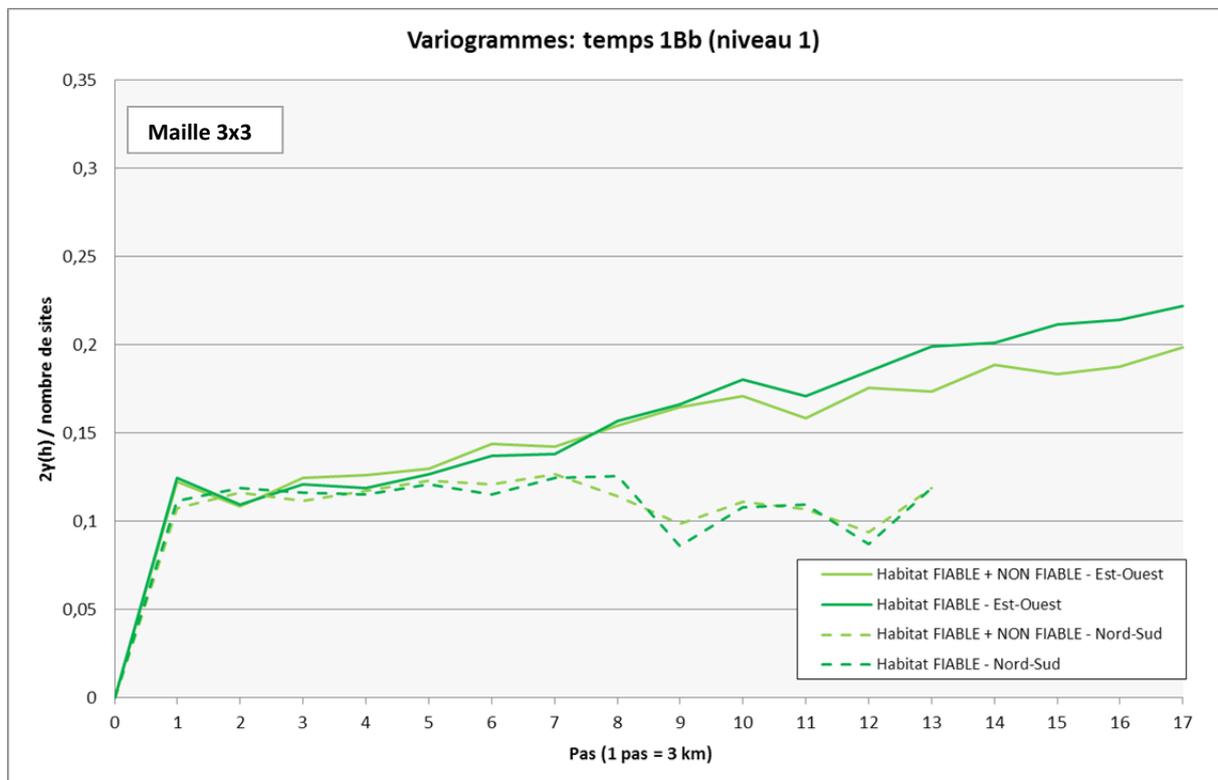


Figure 71 - Variogrammes directionnels pour le temps 1Bb à partir de la maille 3x3 km.

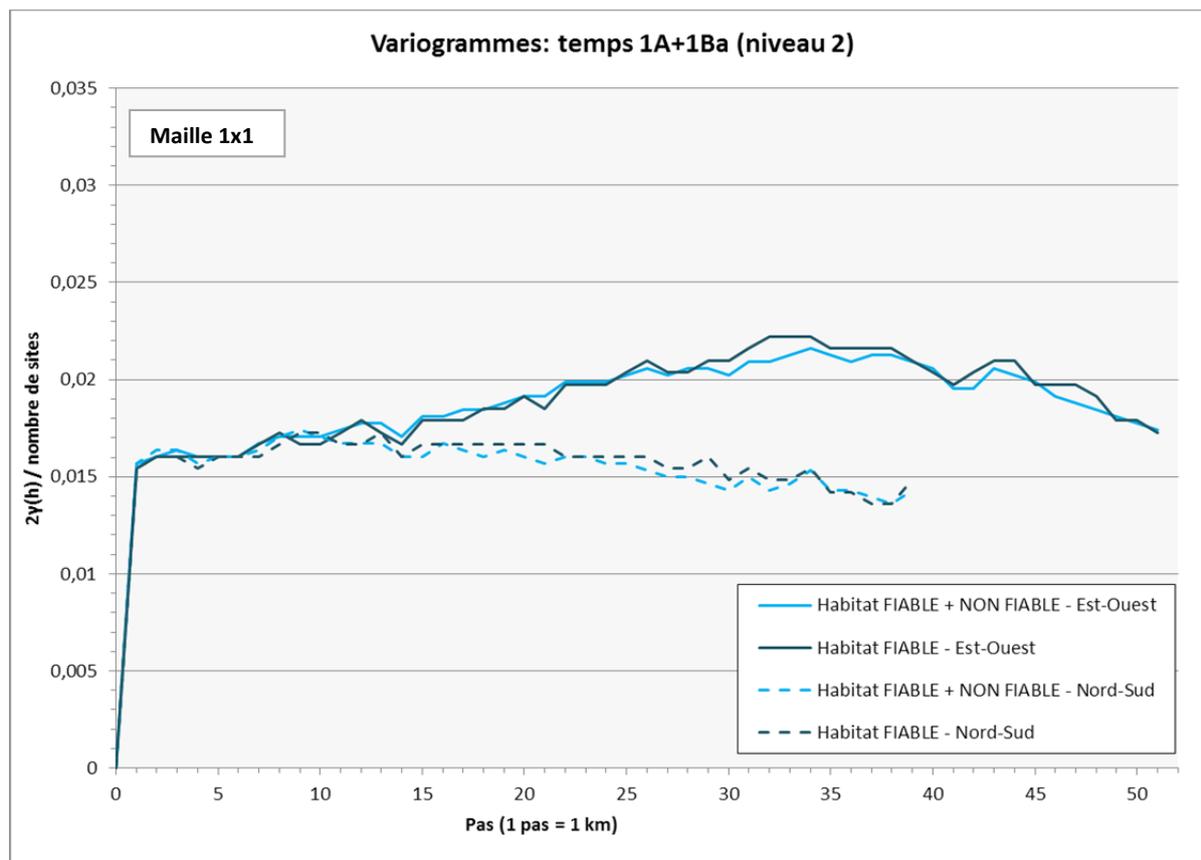


Figure 72 - Variogrammes directionnels pour le temps 1A+1Ba à partir de la maille 1x1 km.

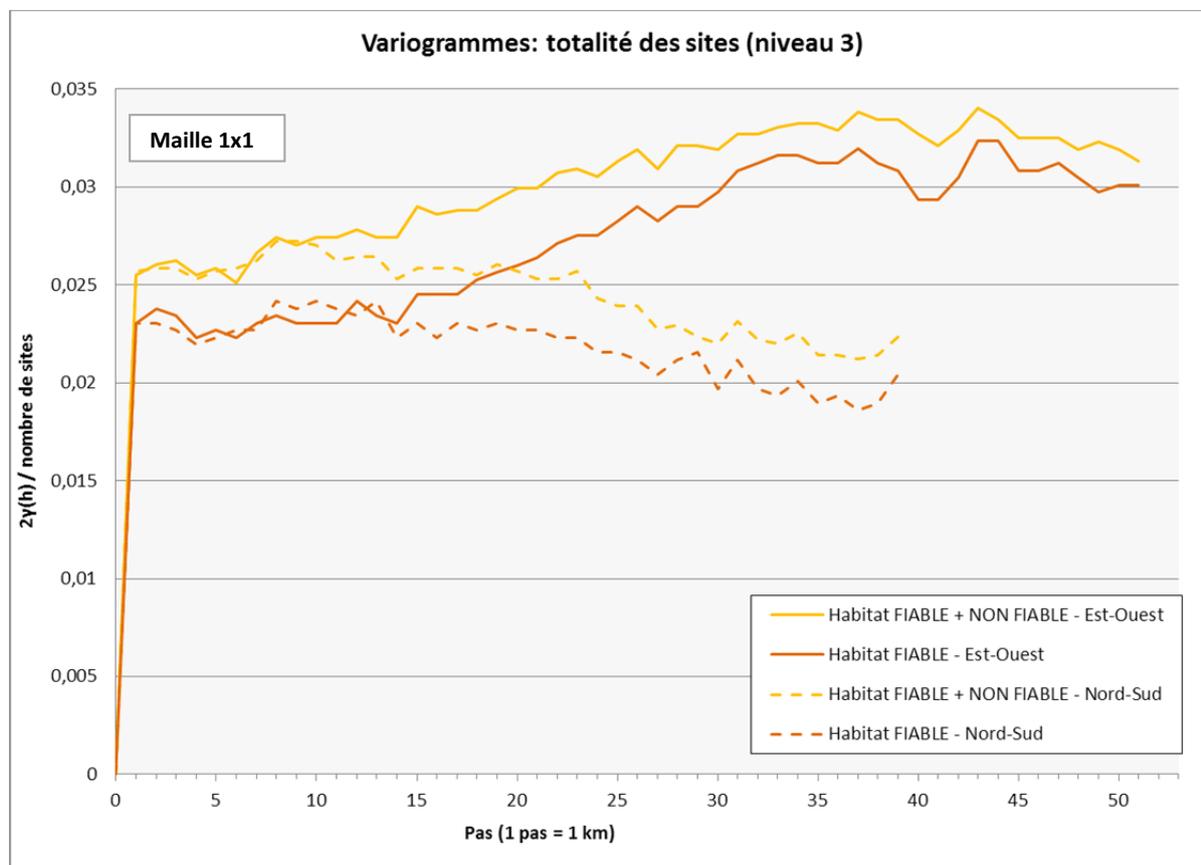


Figure 73 - Variogrammes directionnels pour la totalité des sites à partir de la maille 1x1 km.

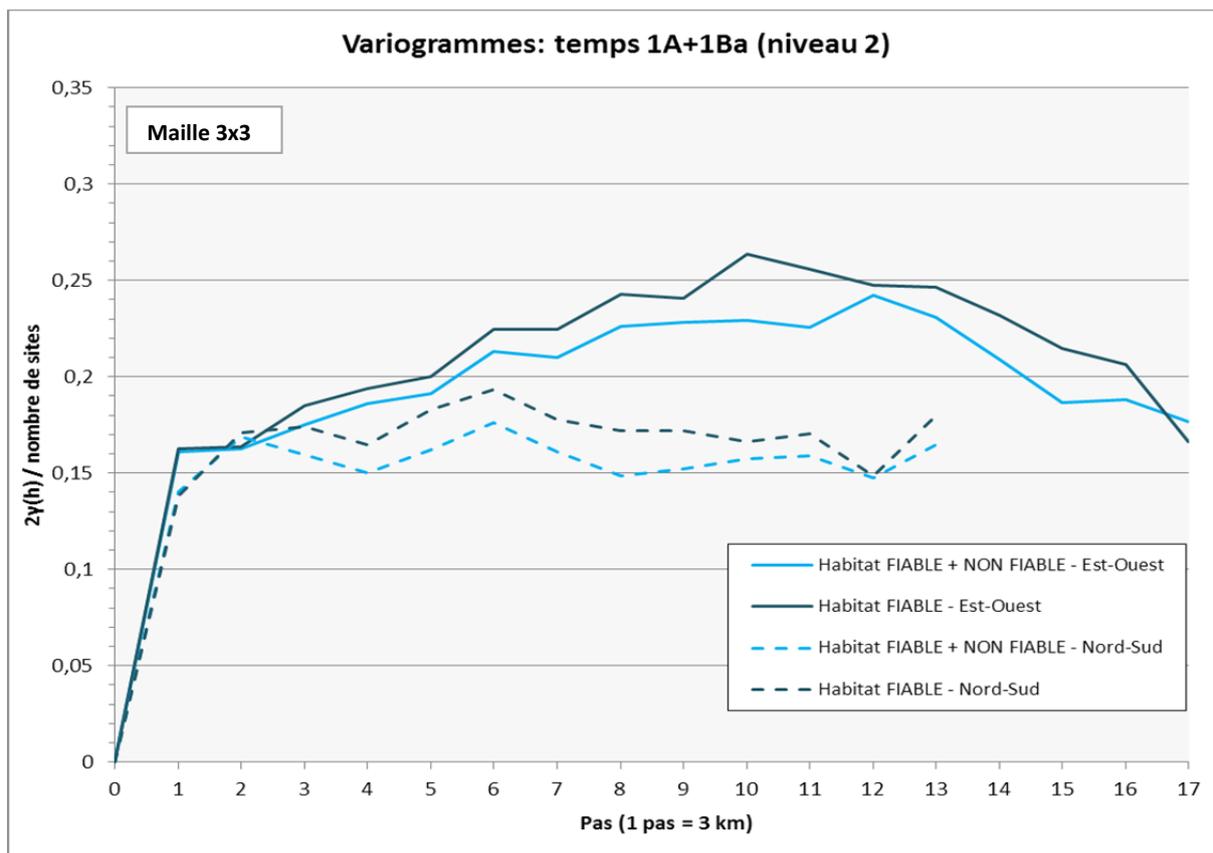


Figure 74 - Variogrammes directionnels pour le temps 1A+1Ba à partir de la maille 3x3 km.

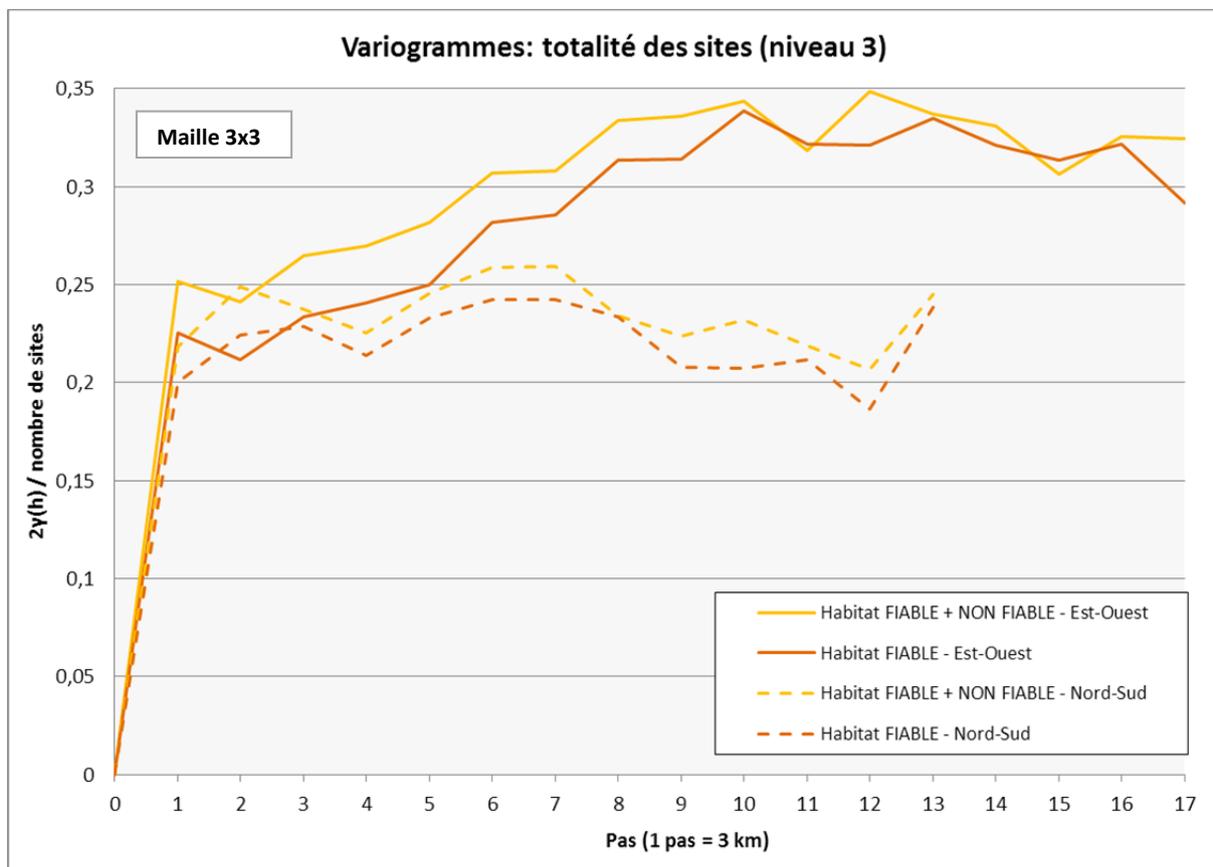


Figure 75 - Variogrammes directionnels pour la totalité des sites à partir de la maille 3x3 km.

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 emboîtement 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.

Ce que l'on peut retenir :

- On préférera 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				% de sites	Habitat fiable	Habitat non fiable
		1Ba	1Bb	1Ca			
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		

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.

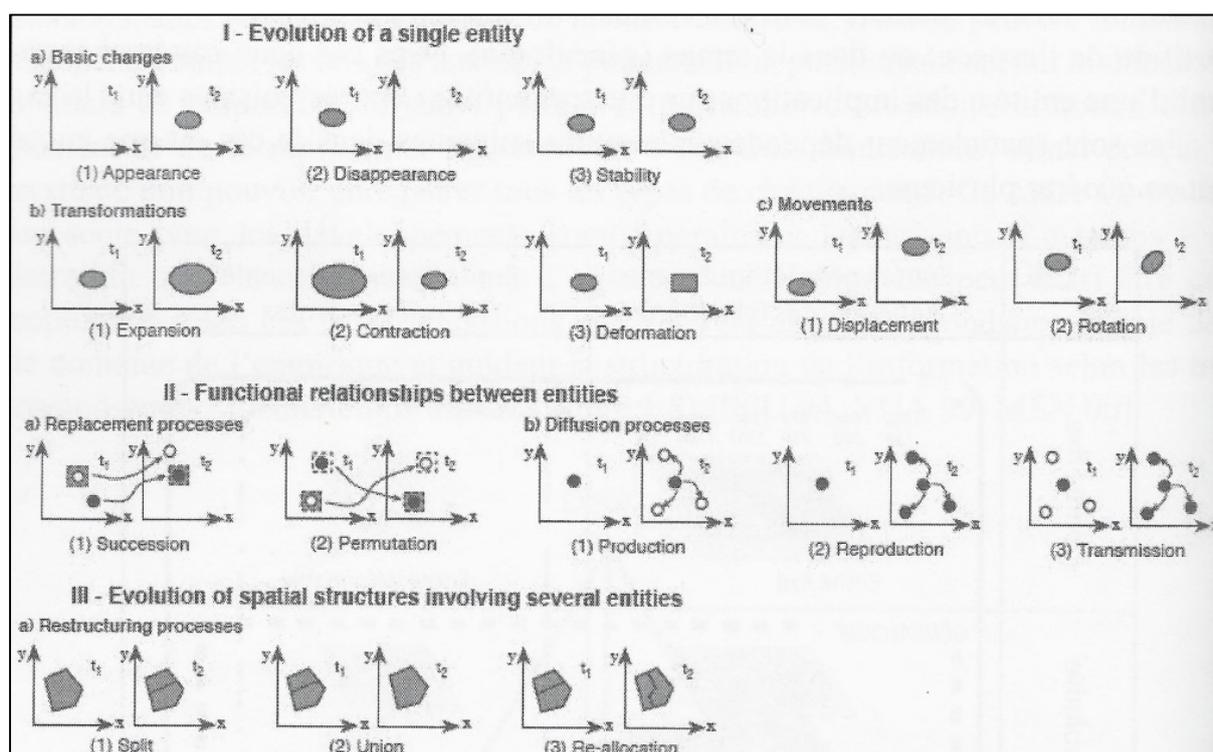


Figure 76 - Les types de processus spatio-temporels (Mathian, Sanders, 2014 ; d'après Claramunt, Thériault, 1995).

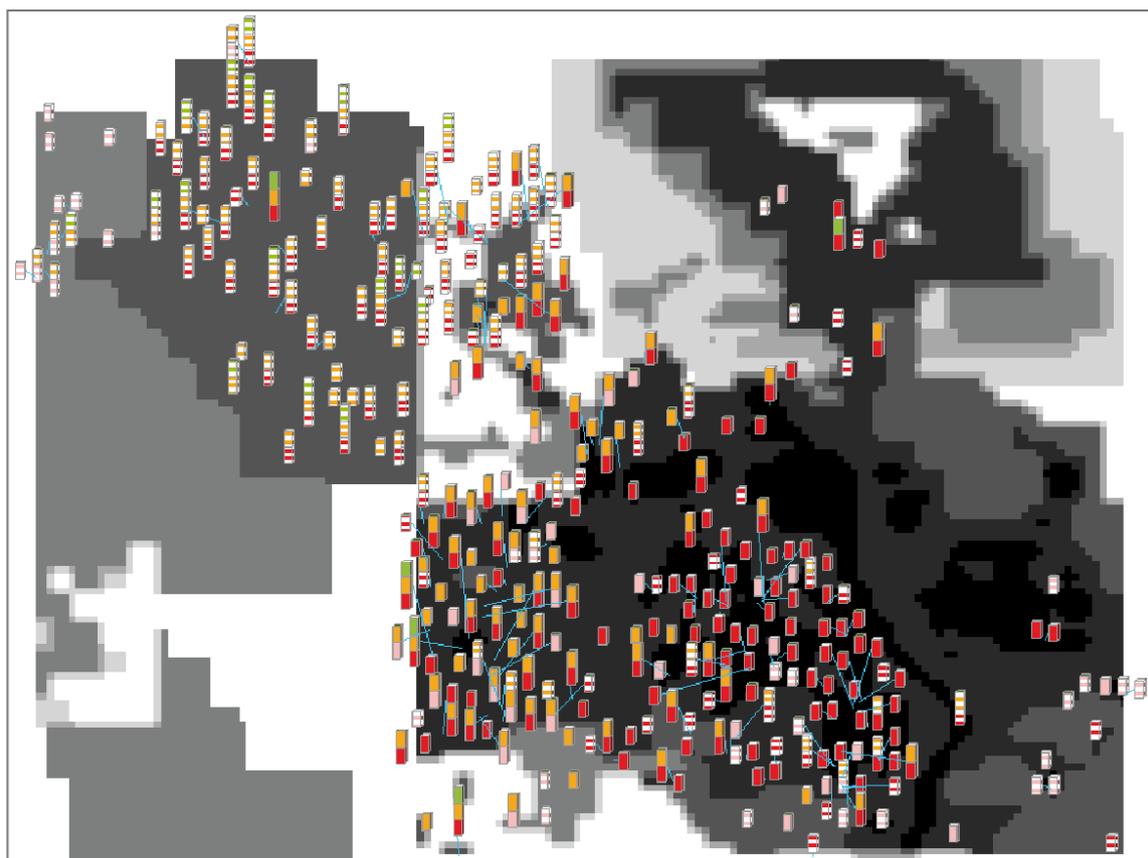
On considère ici les « changements basiques » sur l'évolution d'une entité en elle-même (I-a sur la figure).

- 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)

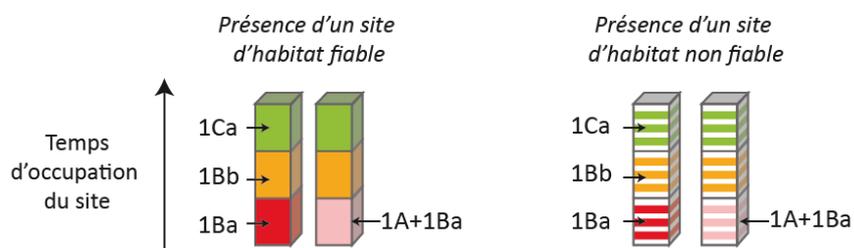
Ces dynamiques se déclinent différemment en fonction du *temps* considéré et du niveau de fiabilité des sites.

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 (1-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 pourrions 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

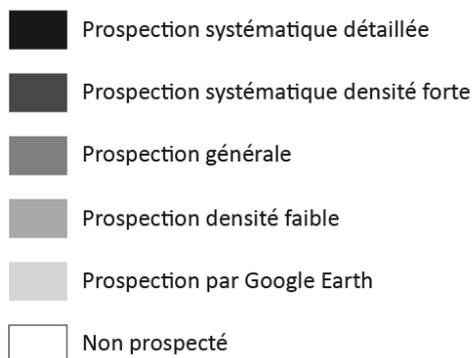
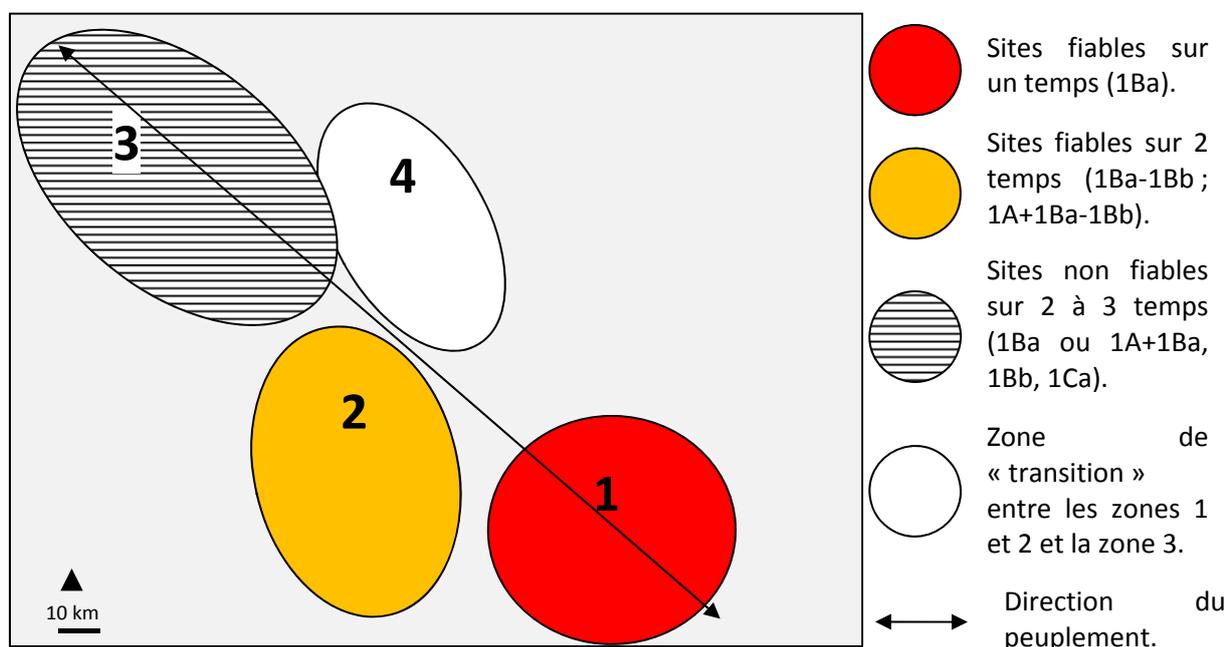


Figure 77 - Spatialisation des trajectoires temporelles des sites et de l'incertitude qui y est associée.

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 km<sup>2</sup> selon le temps considéré, et selon que l'on intègre les sites fiables uniquement, ou bien la totalité des sites.

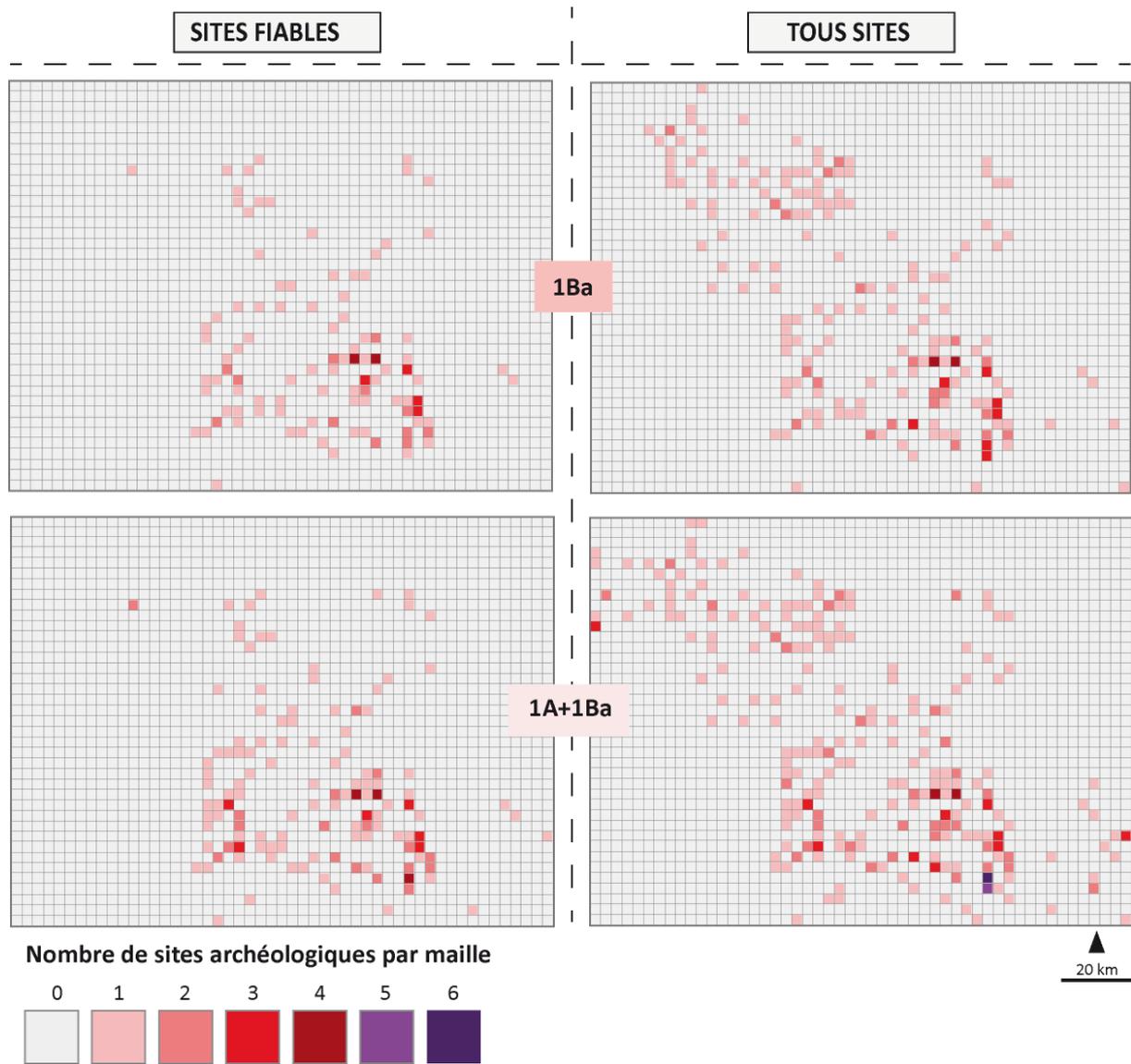


Figure 79 - Nombre de sites archéologiques par maille pour les *temps* 1Ba et 1A+1Ba.

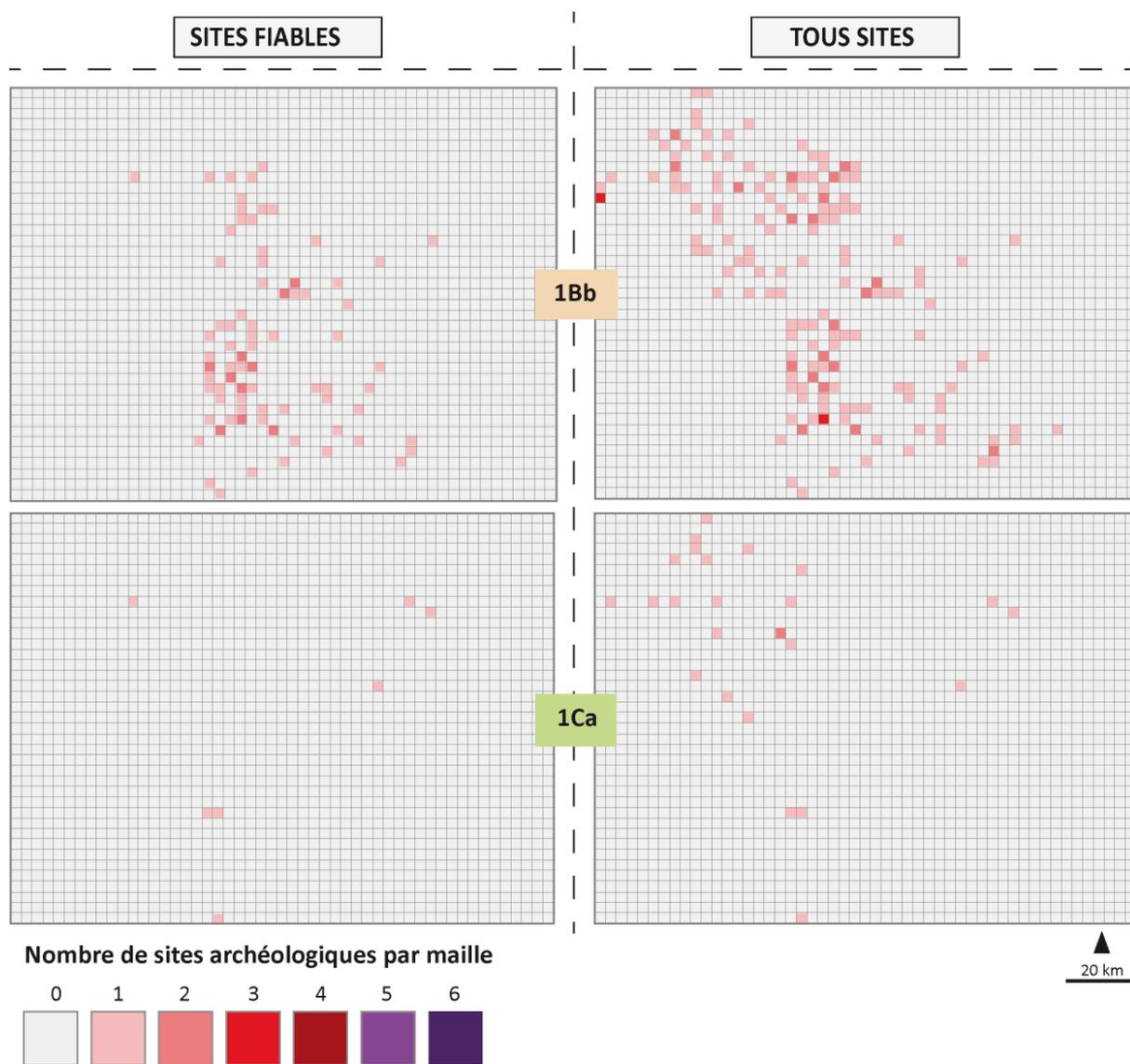
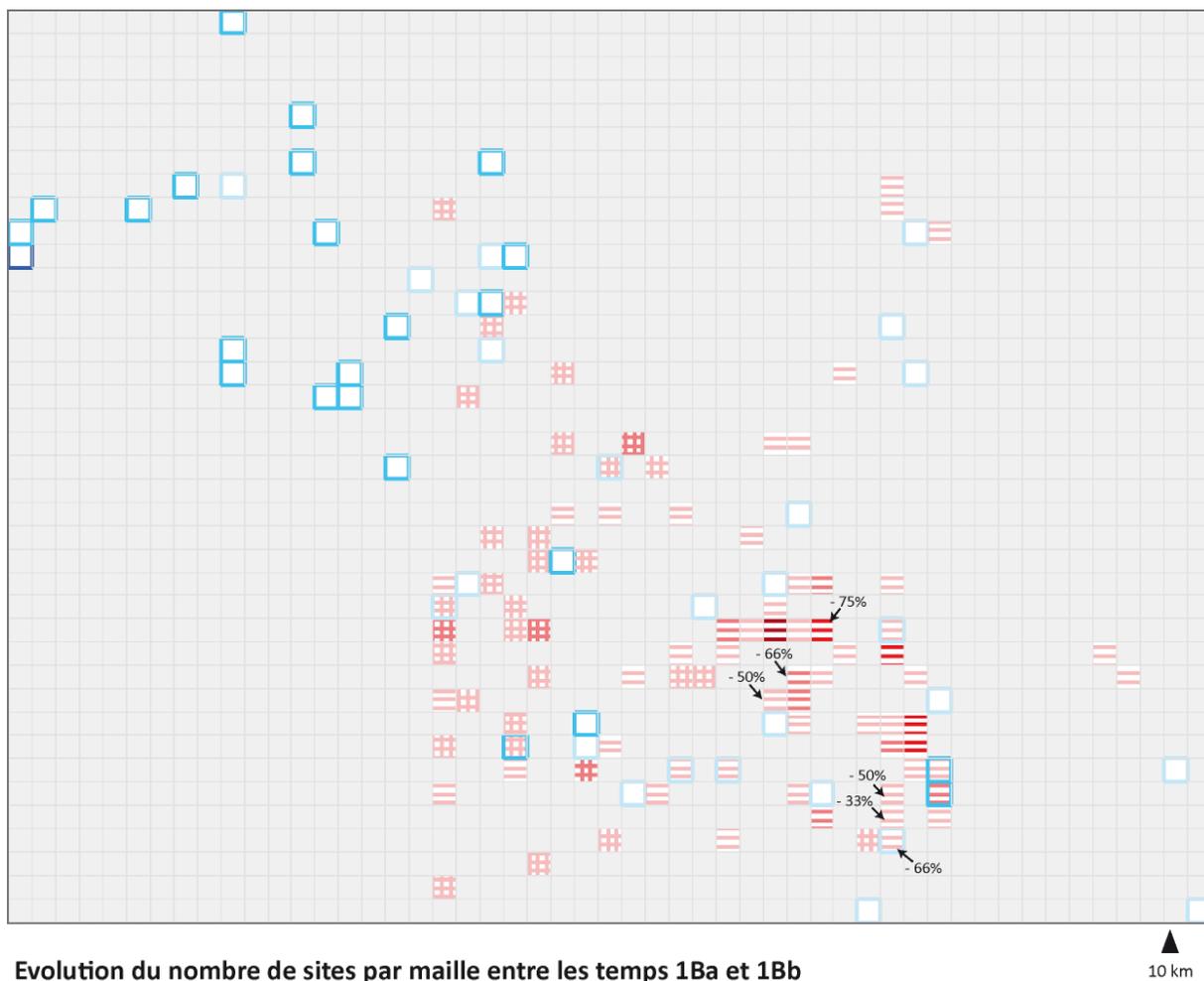


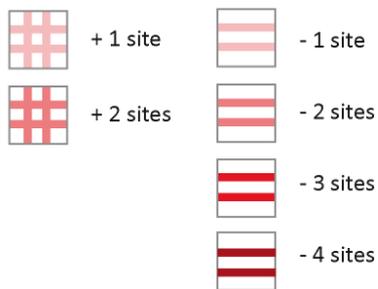
Figure 80 - Nombre de sites archéologiques par maille pour les *temps* 1Bb et 1Ca.

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).



Evolution du nombre de sites par maille entre les temps 1Ba et 1Bb

**Changement dans le nombre de sites fiables**

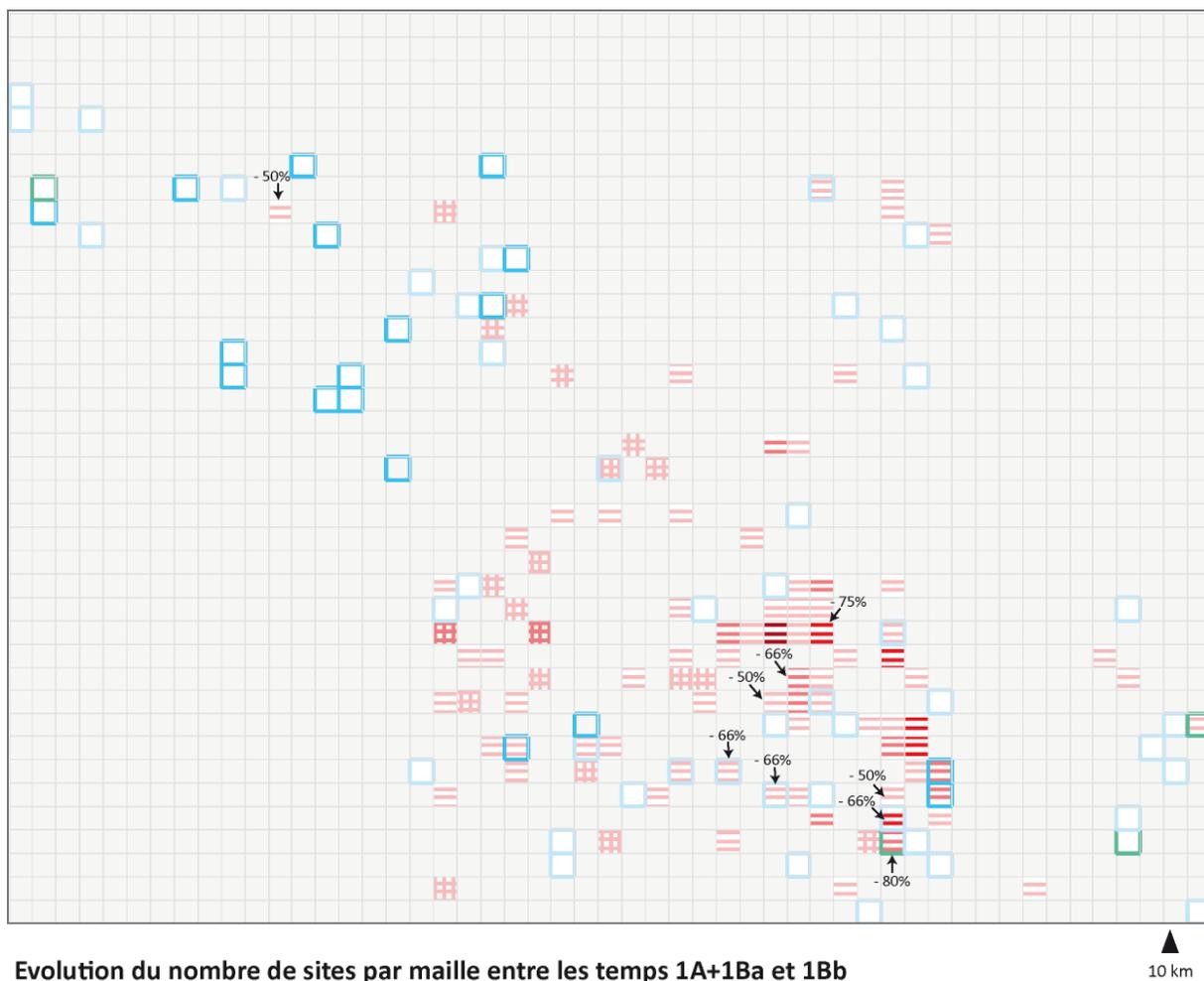


**Changement dans le nombre de sites non fiables**

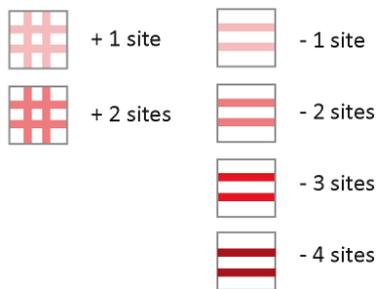


- 50% → **Pourcentage du nombre de sites disparus** par rapport au nombre initial de sites dans la maille (si non renseigné: 100% des sites disparus)

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



**Changement dans le nombre de sites fiables**

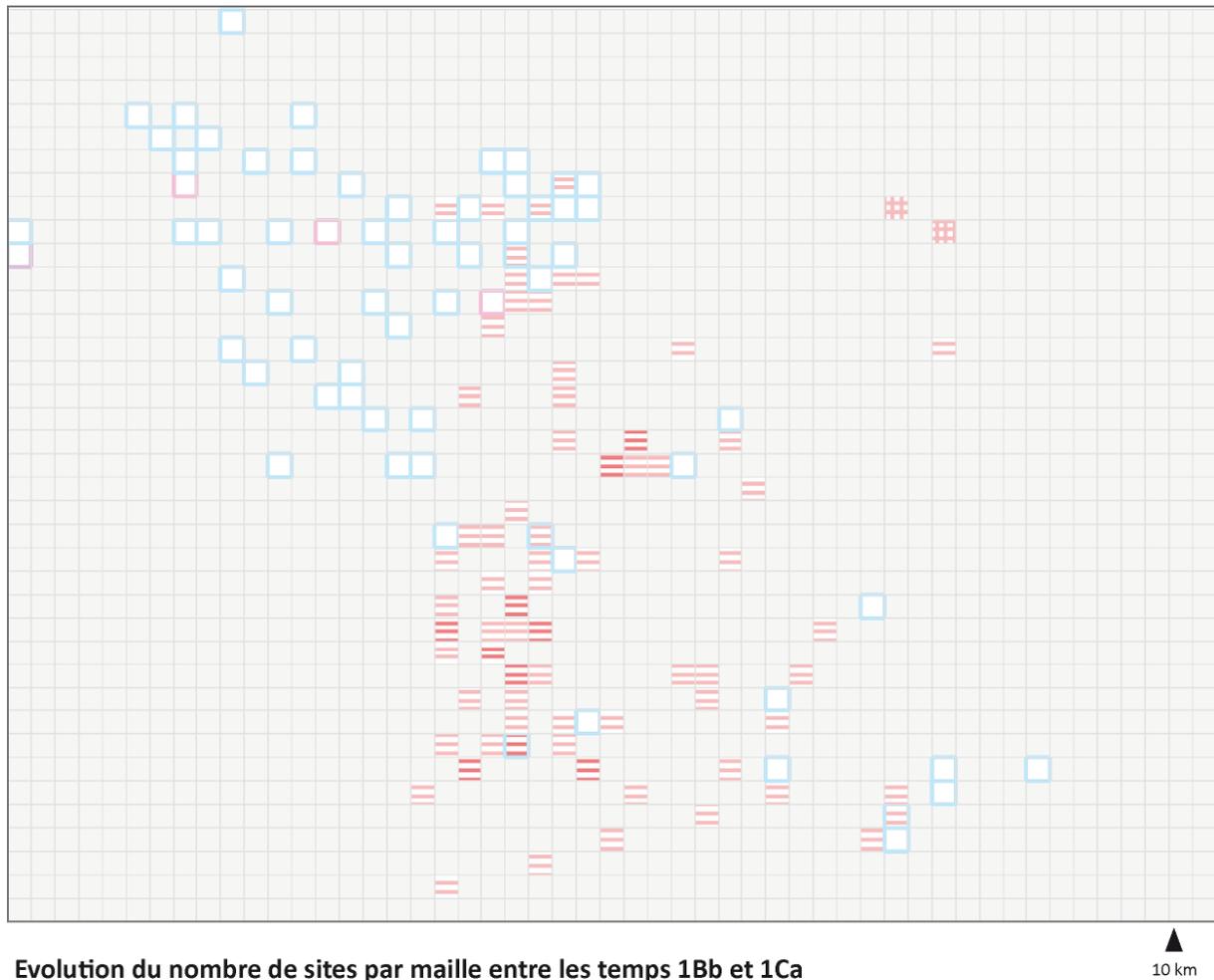


**Changement dans le nombre de sites non fiables**



- 50% → **Pourcentage du nombre de sites disparus par rapport au nombre initial de sites dans la maille (si non renseigné: 100% des sites disparus)**

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



Changement dans le nombre de sites fiables



+ 1 site



- 1 site



- 2 sites

Changement dans le nombre de sites non fiables



- 1 site

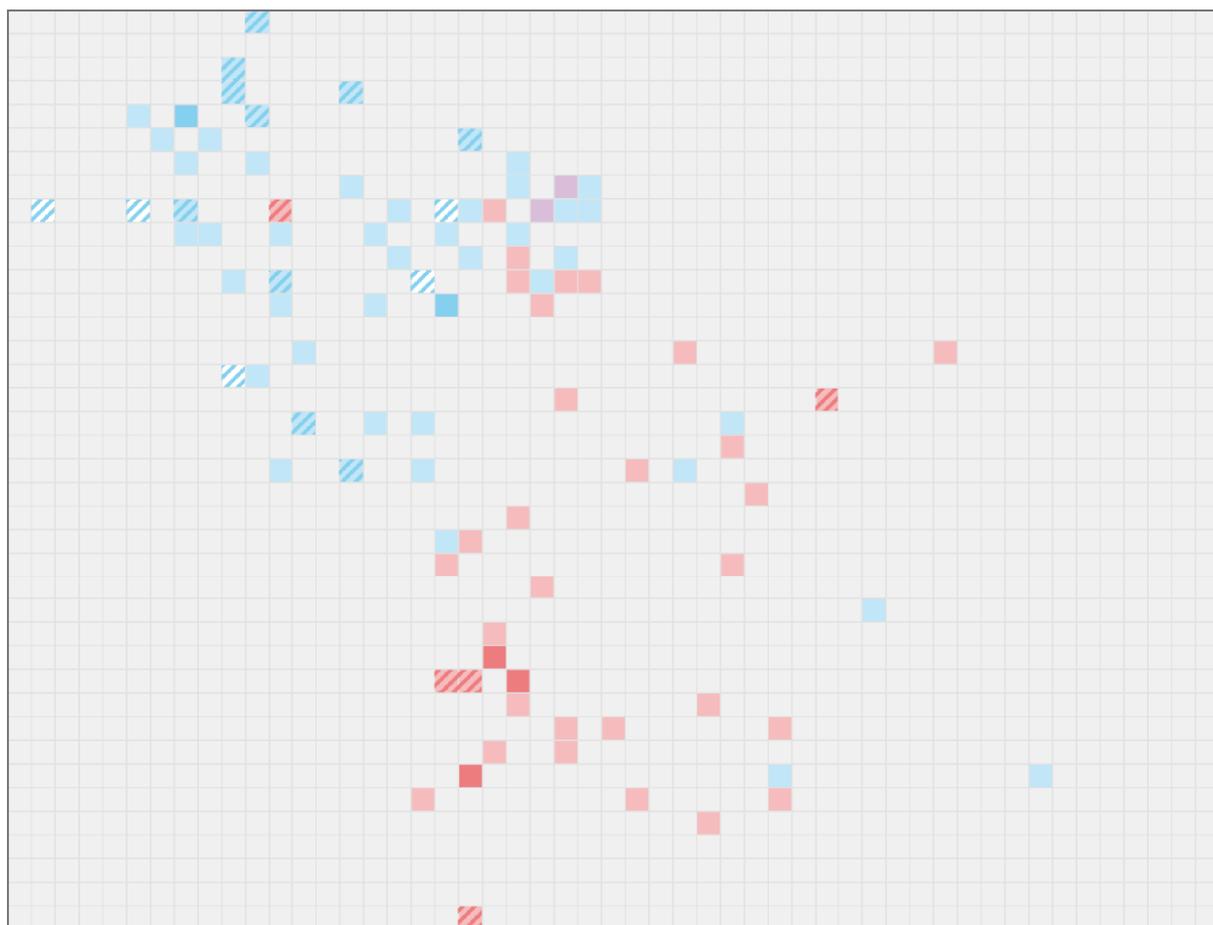


- 2 sites



- 3 sites

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



Mailles dont le nombre de sites demeure inchangé entre les temps 1Ba, 1Bb et 1Ca

▲  
10 km

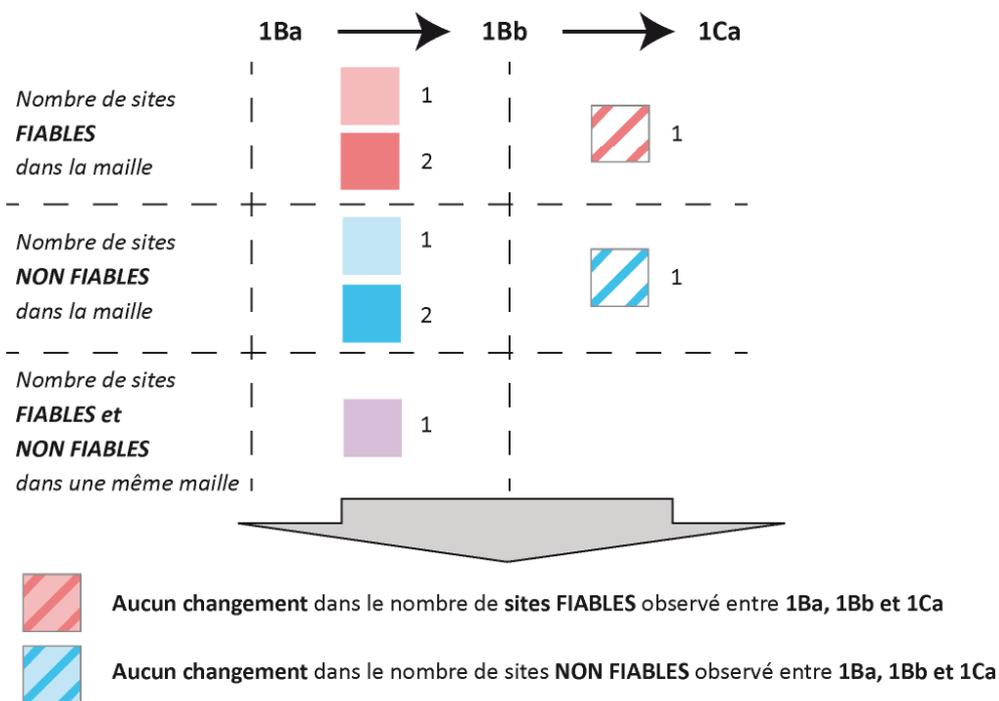
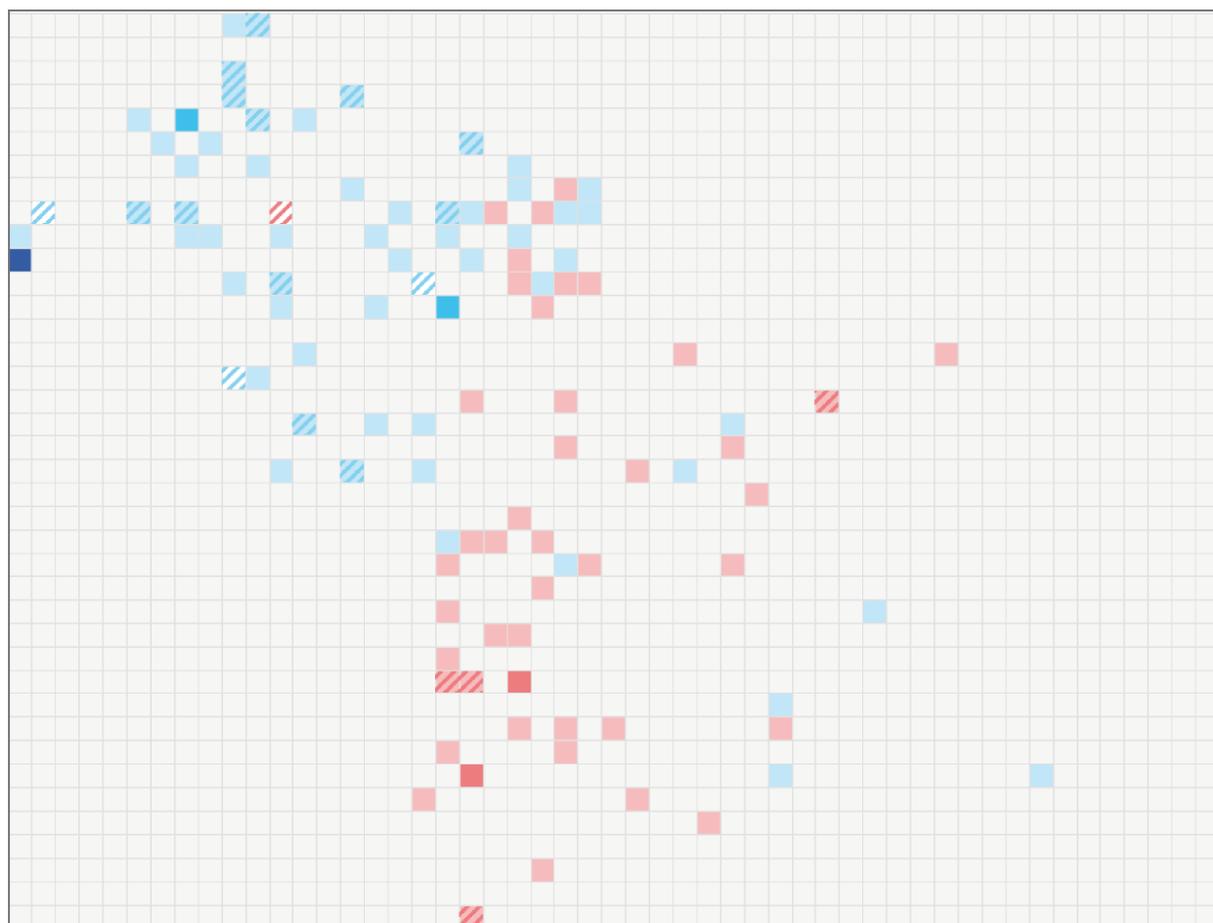
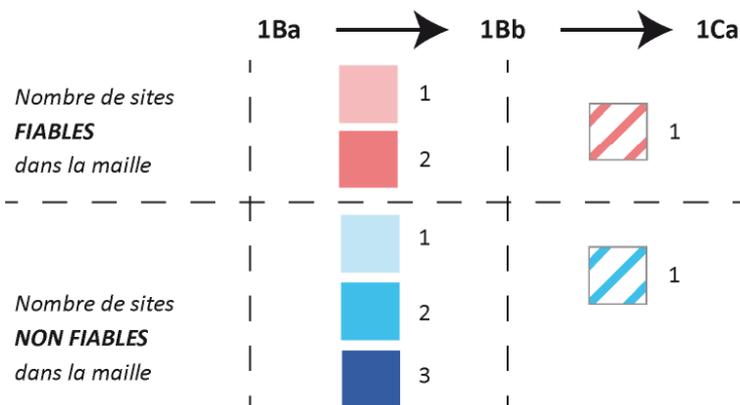


Figure 84 - Représentation des mailles dont le nombre de sites reste stable entre les temps 1Ba, 1Bb et 1Ca.



Mailles dont le nombre de sites demeure inchangé entre les temps 1A+1Ba, 1Bb et 1Ca

▲  
10 km



Aucun changement dans le nombre de sites **FIABLES** observé entre 1A+1Ba, 1Bb et 1Ca



Aucun changement dans le nombre de sites **NON FIABLES** observé entre 1A+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.

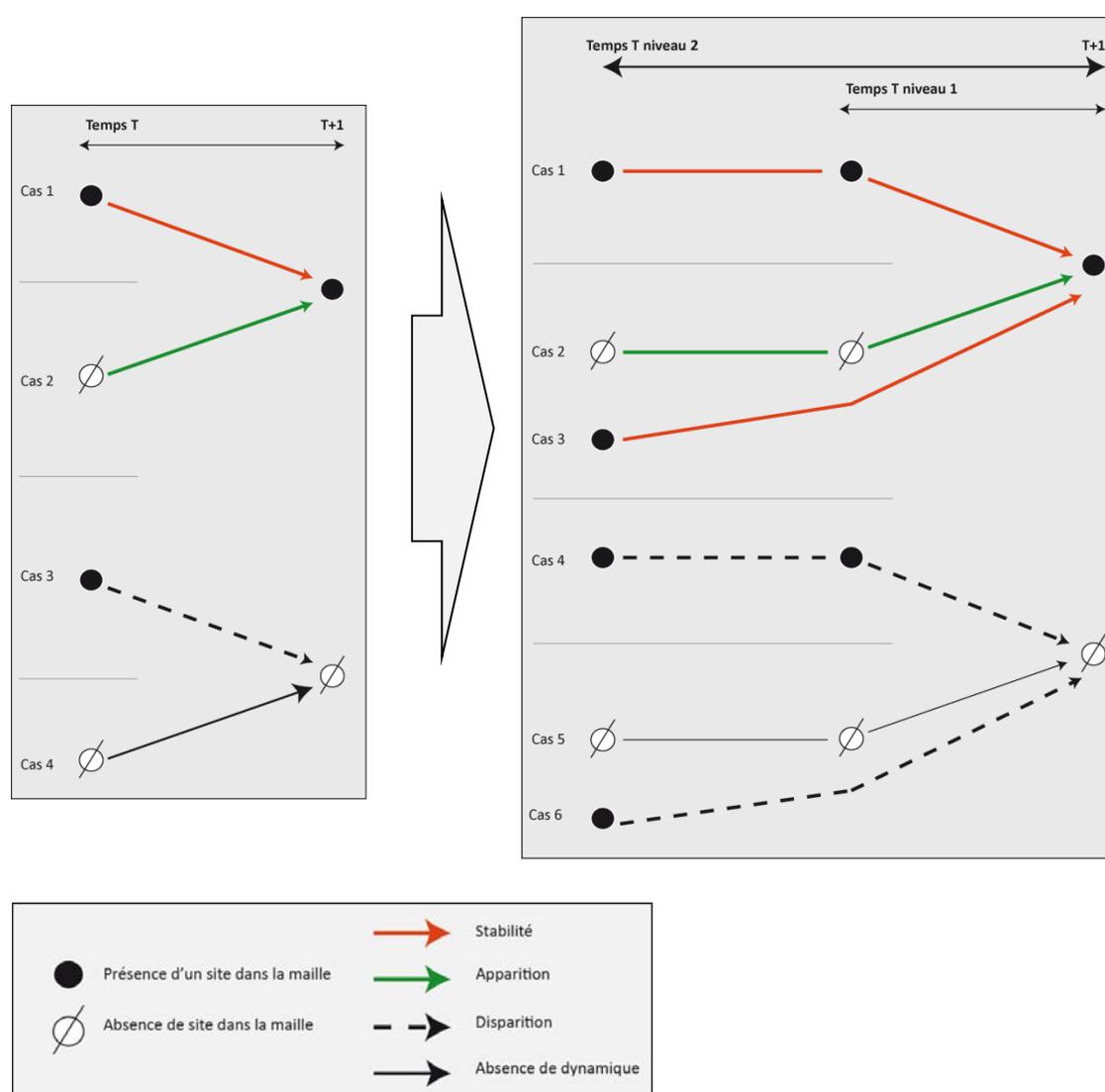


Figure 86 - Différences dans l'observation des dynamiques du peuplement, causées par l'introduction d'un niveau temporel supplémentaire.

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 (Lizard, 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  $L_i$  (Zaninetti, 2005). Le LISA  $L_i$  d'une variable  $Y$ , observée en un lieu  $i$  se définit tel que (Anselin, 1995):

$$L_i = f(Y_i, Y_{J_i})$$

Où  $f$  est une fonction et  $Y_{J_i}$  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 contiguïté  $W_{ij}$  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 :

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

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.

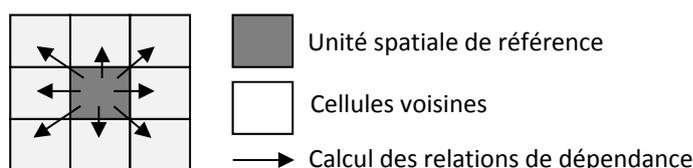


Figure 87 - Relations de voisinage définies par le "cas de la reine"

- 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%).

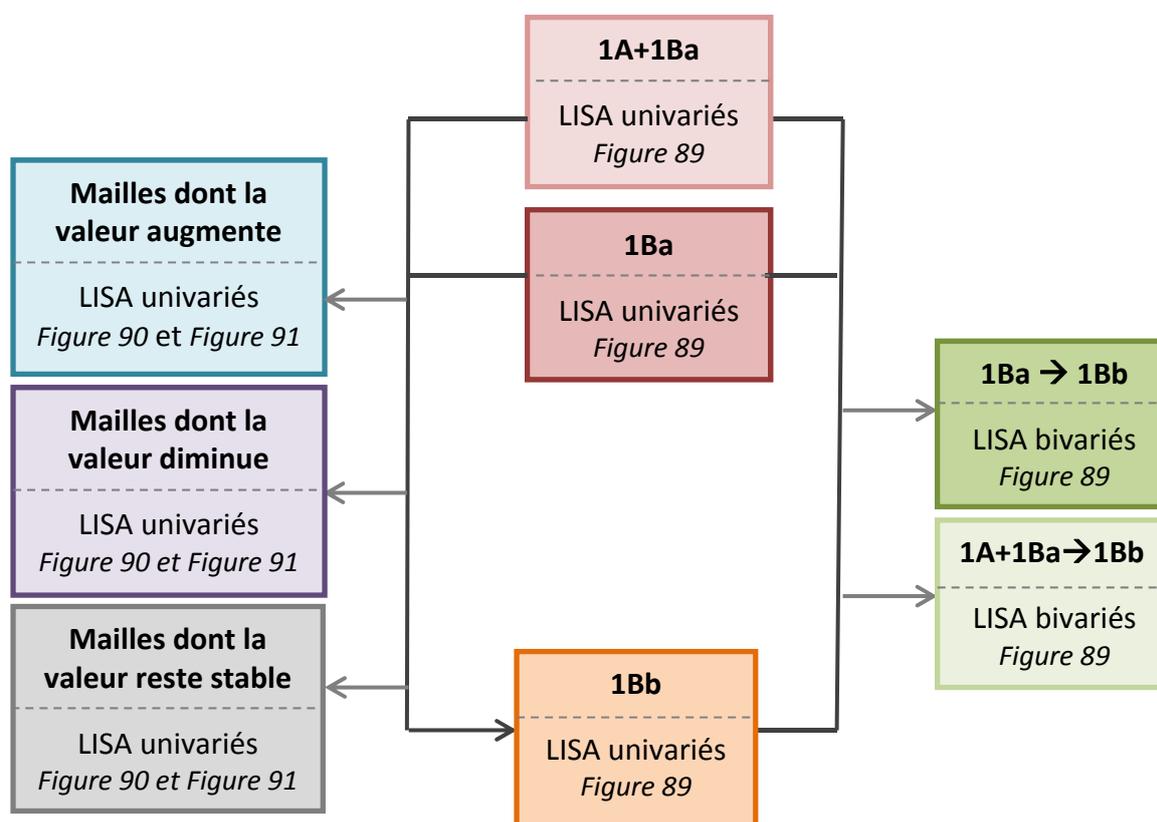


Figure 88 - Les divers types de LISA calculés

### 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.

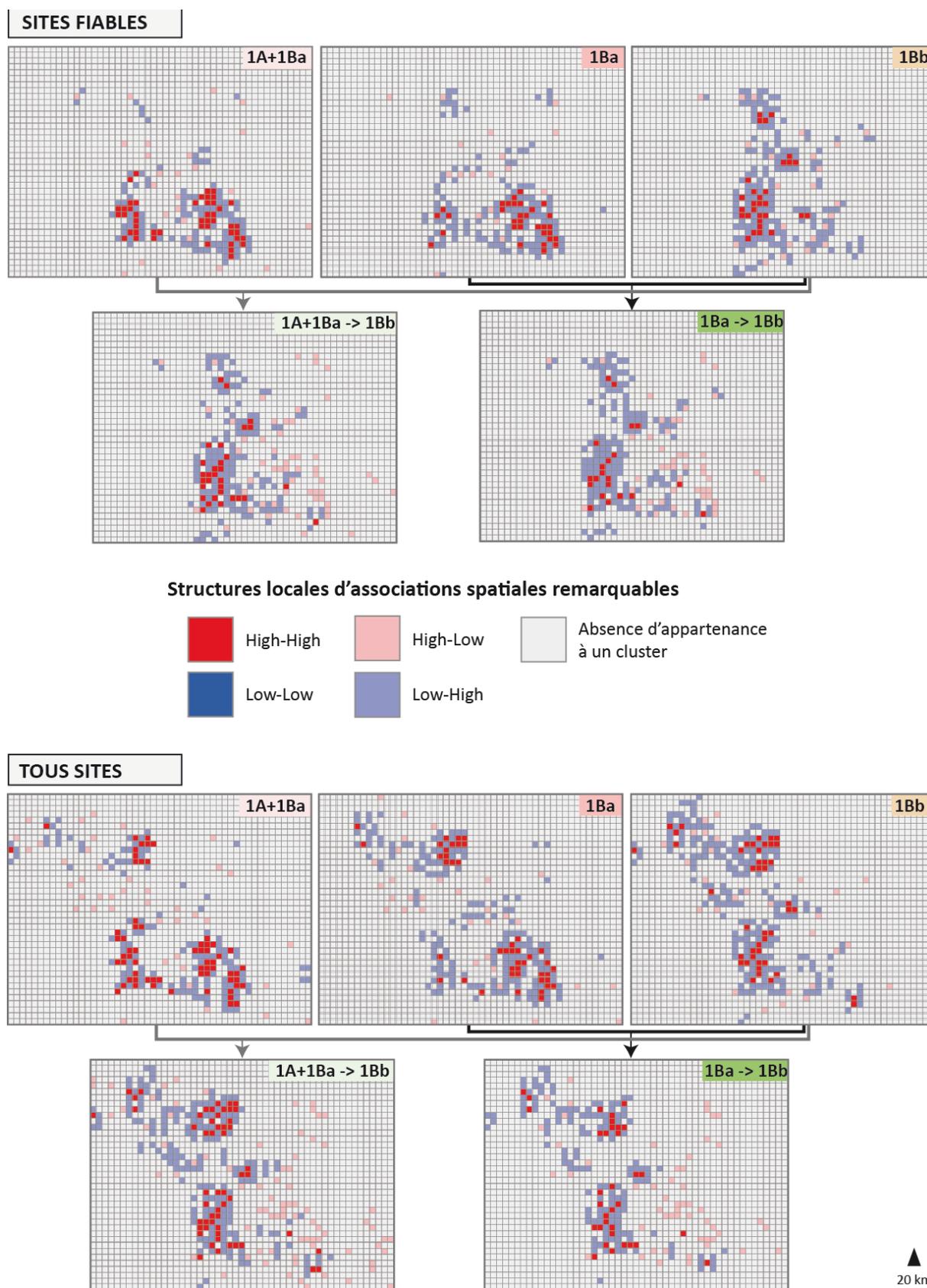


Figure 89 - Résultats des LISA univariés (réalisés sur le nombre de sites par maille pour chaque temps) et bivariés (réalisés entre les *temps* 1A+1Ba et 1Bb, et entre 1Ba et 1Bb).



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).

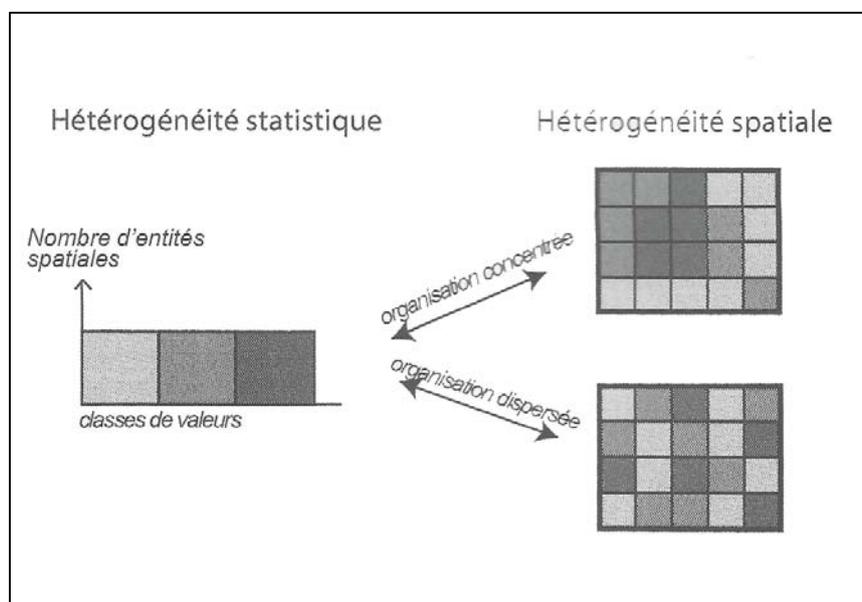


Figure 92 - Hétérogénéité statistique et hétérogénéité spatiale (Mathian, Sanders 2014)

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).

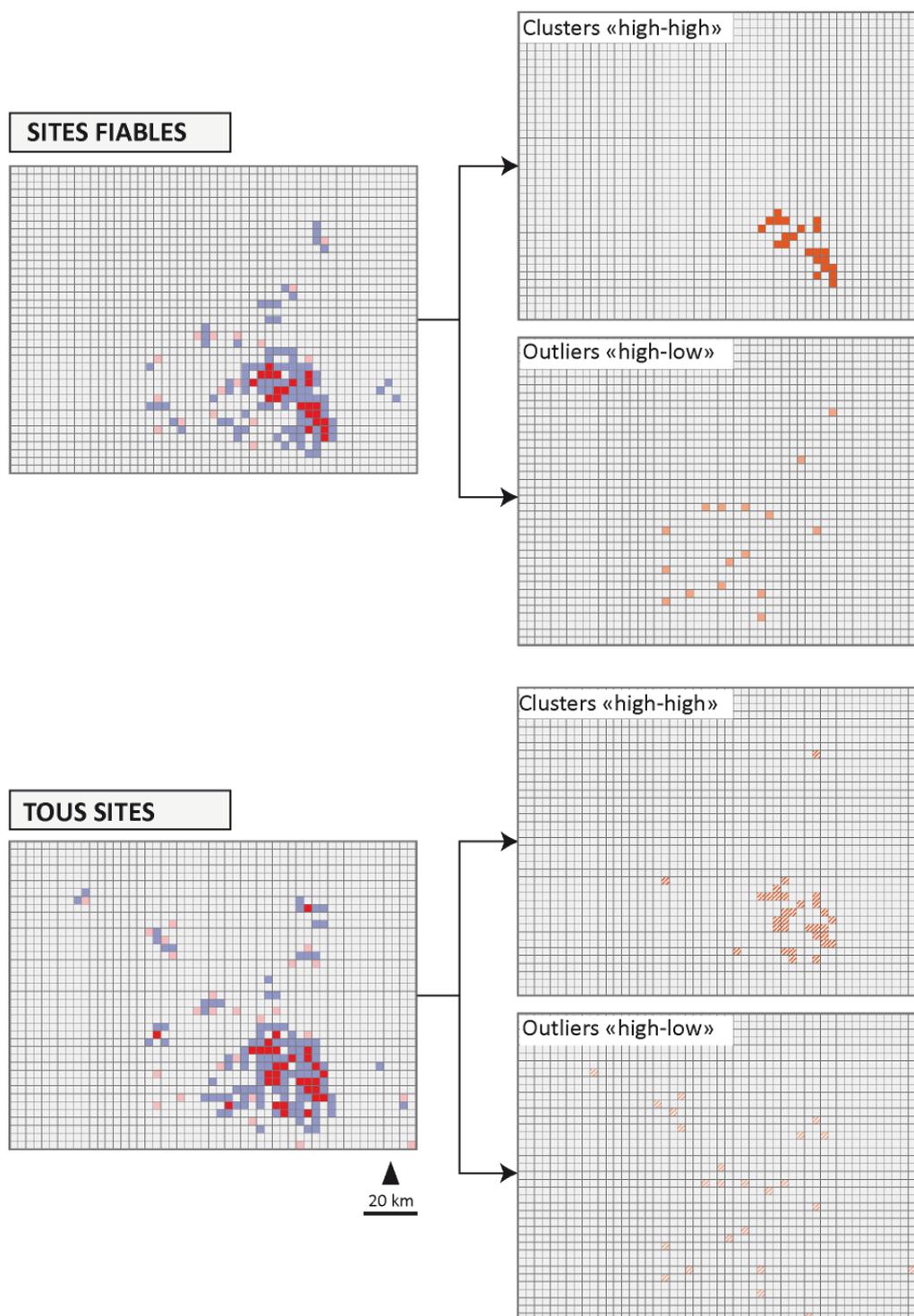
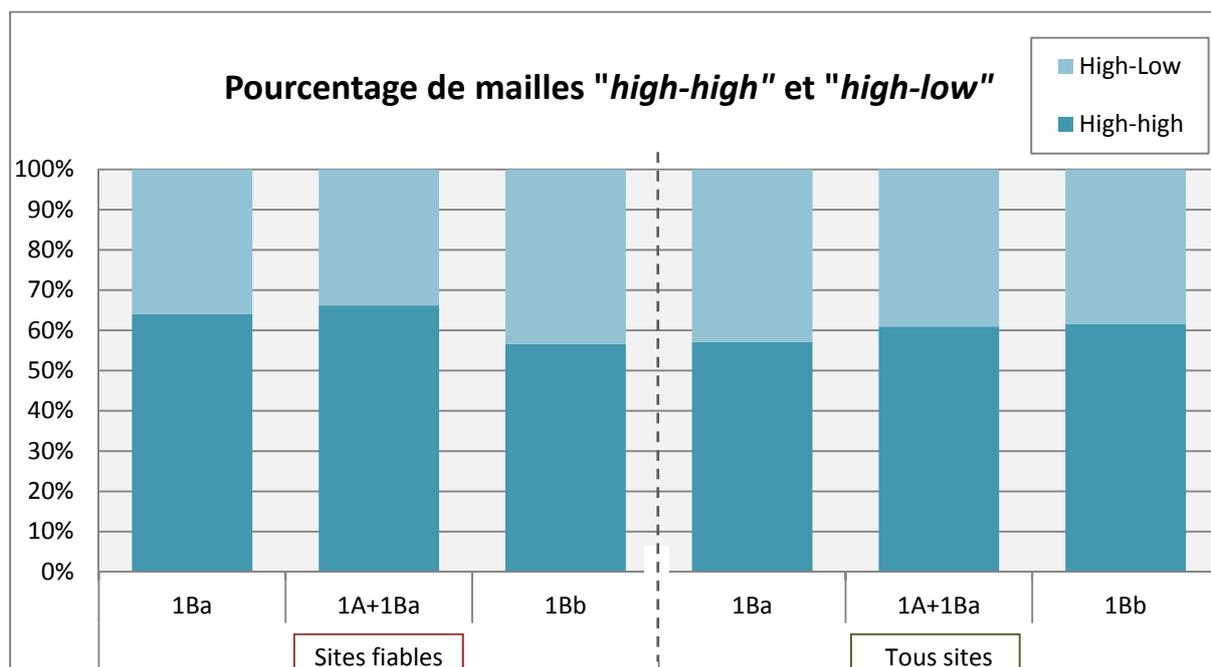


Figure 93 - Extraction des mailles "high-high" et "high-low" des résultats des LISA

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.

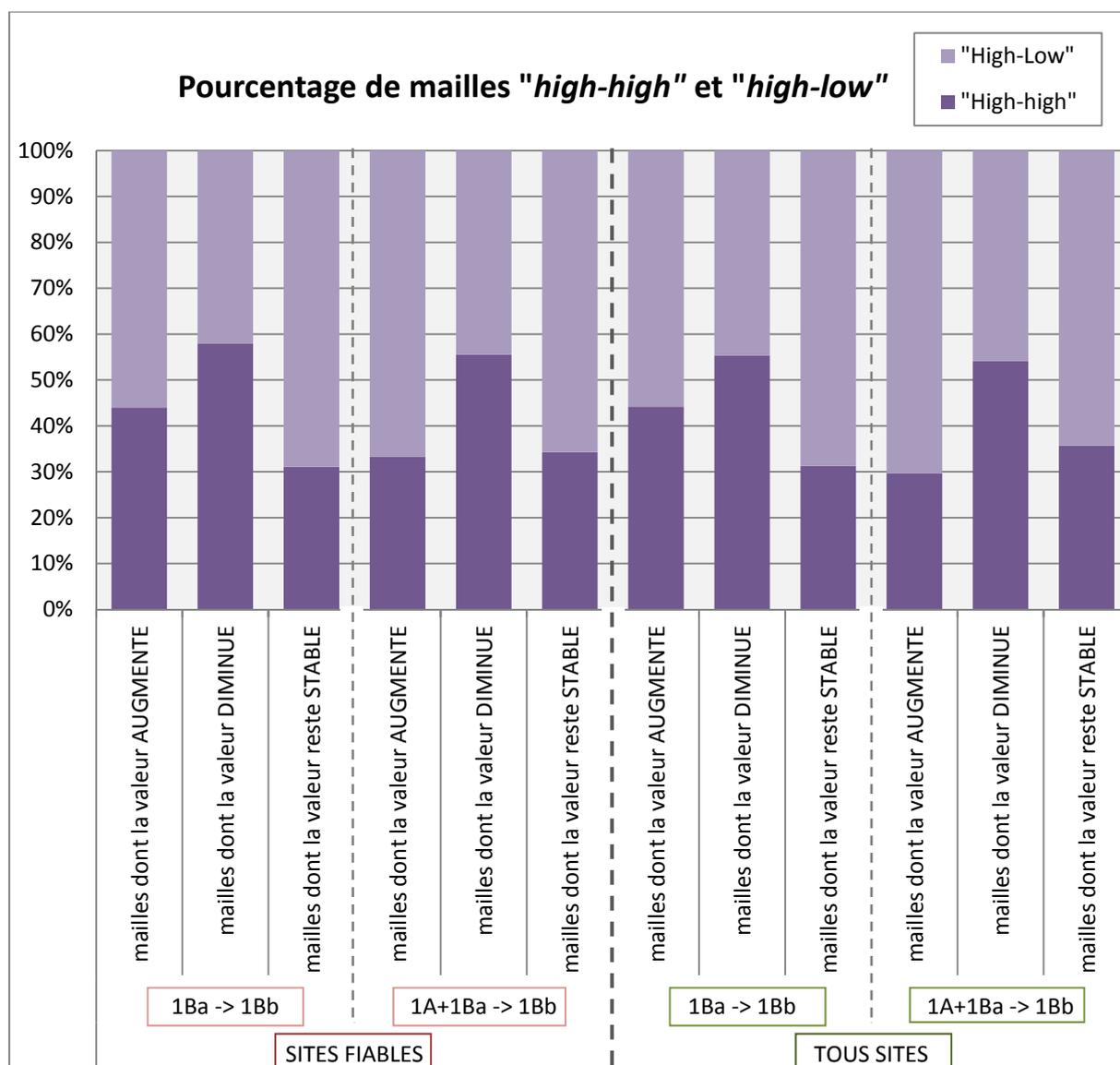


Figure 95 - Pourcentage du nombre de mailles représentées par le cluster "high-high" et l'outlier "high-low" pour les LISA calculés sur le changement entre les temps 1Ba et 1Bb et 1A+1Ba et 1Bb, et par niveau de fiabilité.

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).

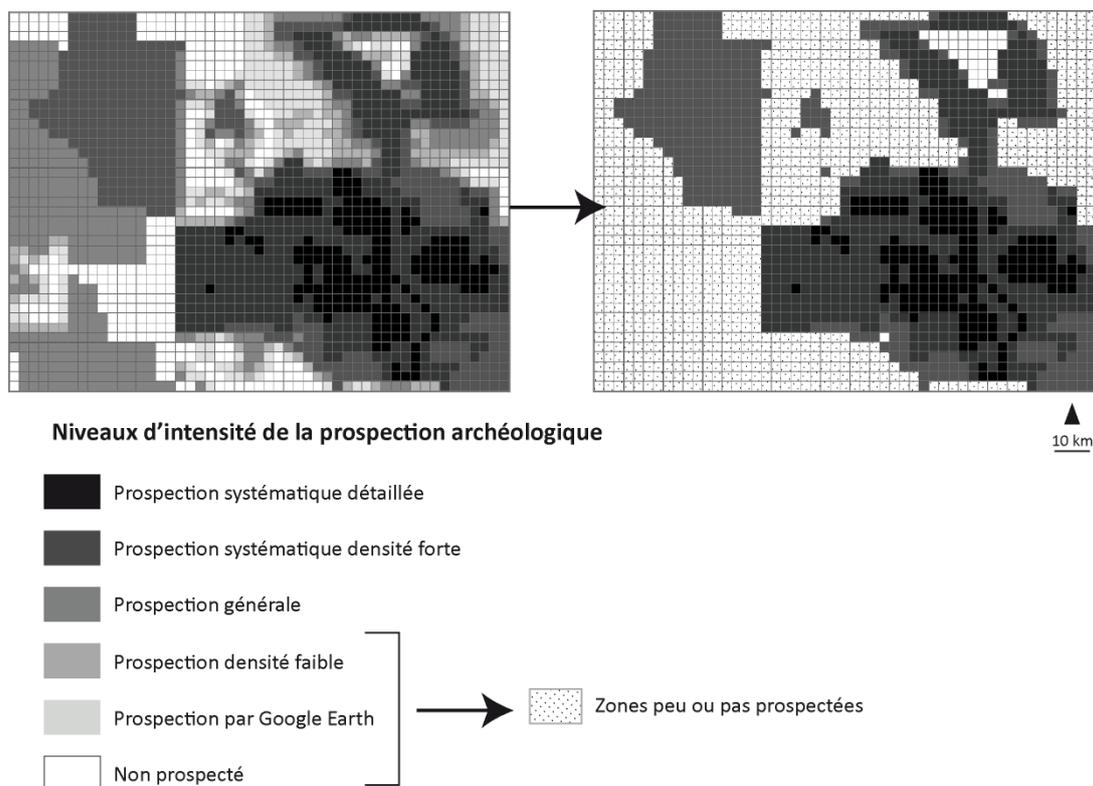


Figure 96 - Identification des zones dites "peu ou pas prospectées" représentées sur les figures suivantes.

#### 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 ambiguïté » (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-spots* 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).

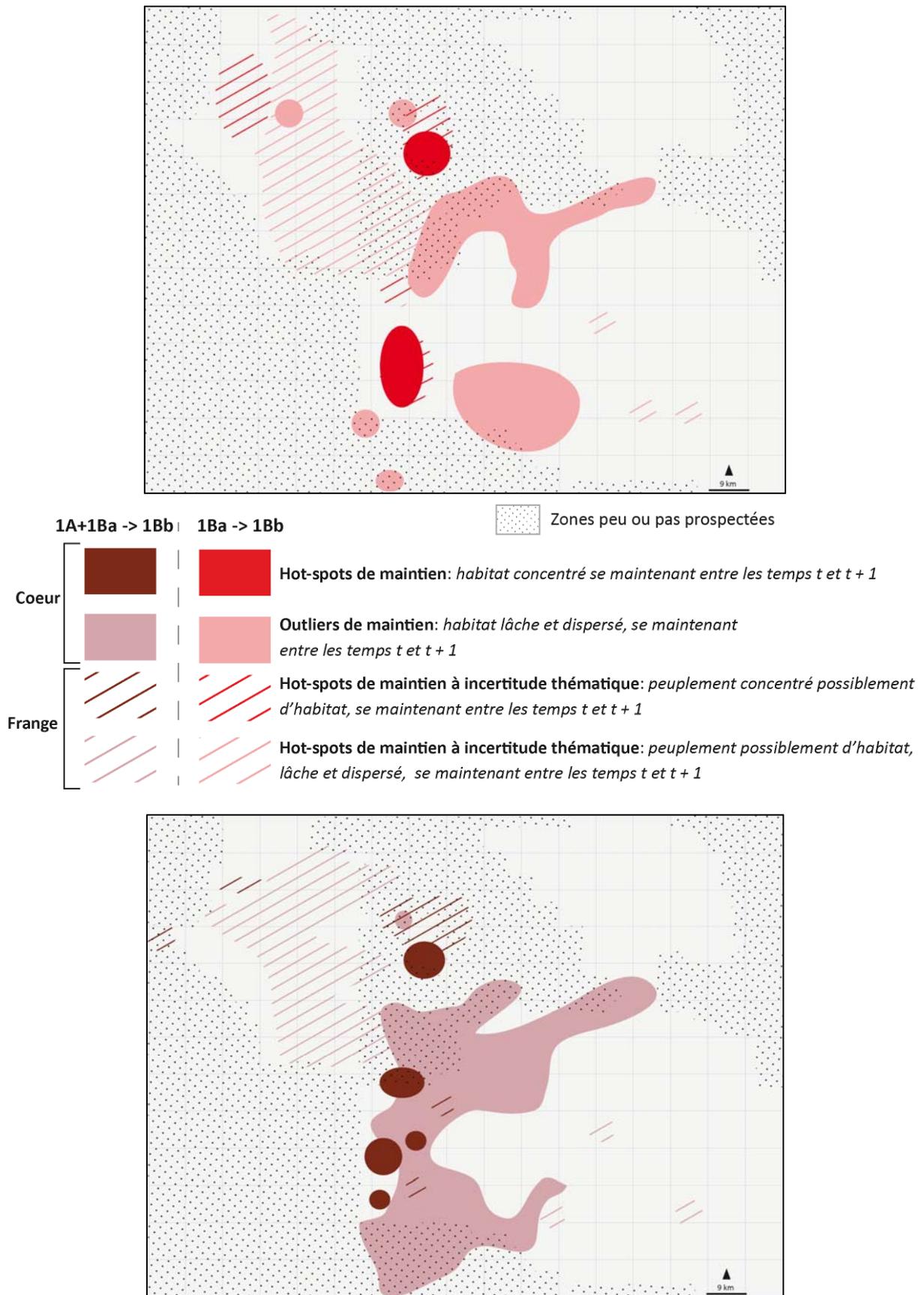


Figure 97 – Zones floues de stabilité à partir de deux niveaux temporels

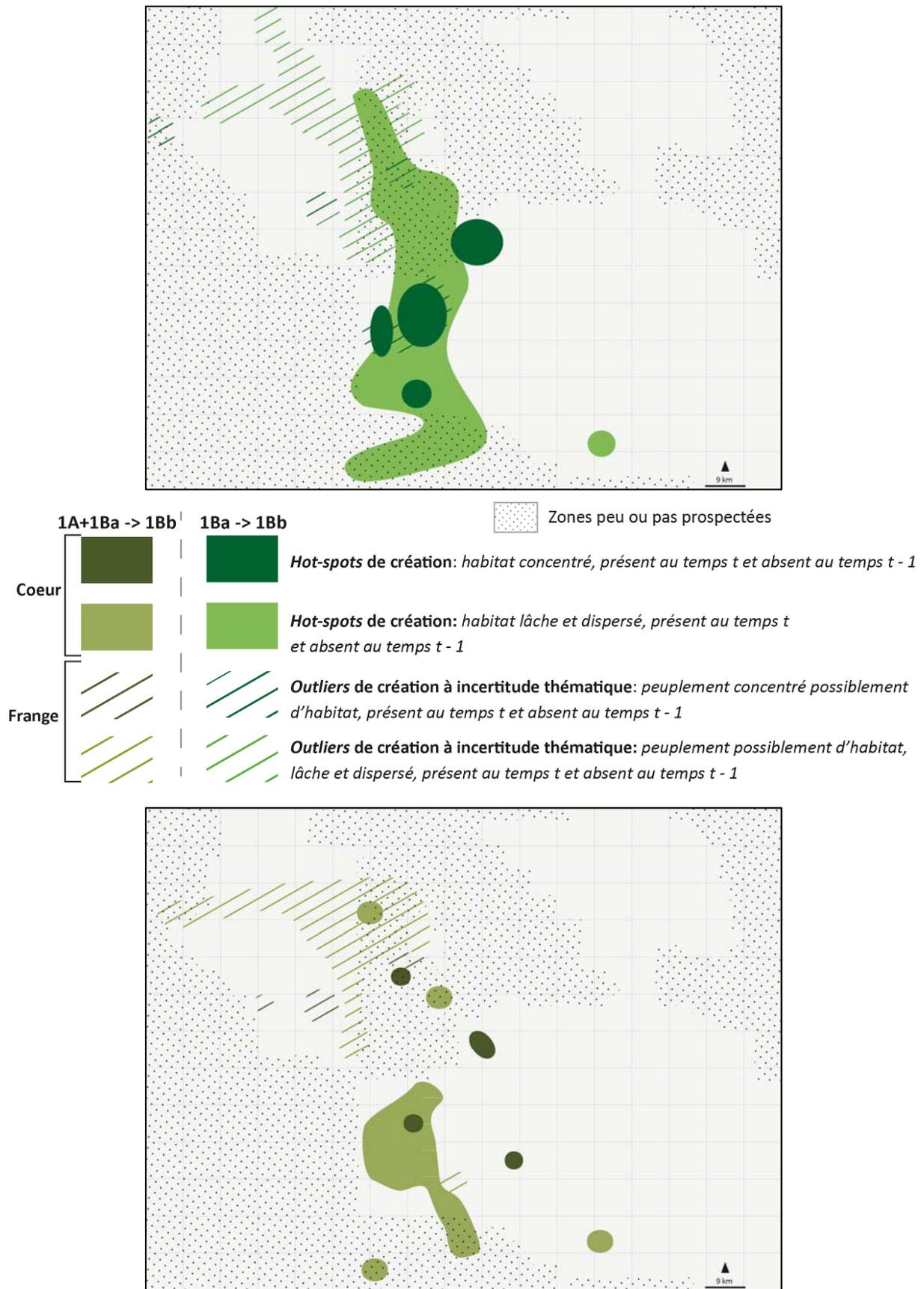


Figure 98 - Zones floues d'apparition à partir de deux niveaux temporels

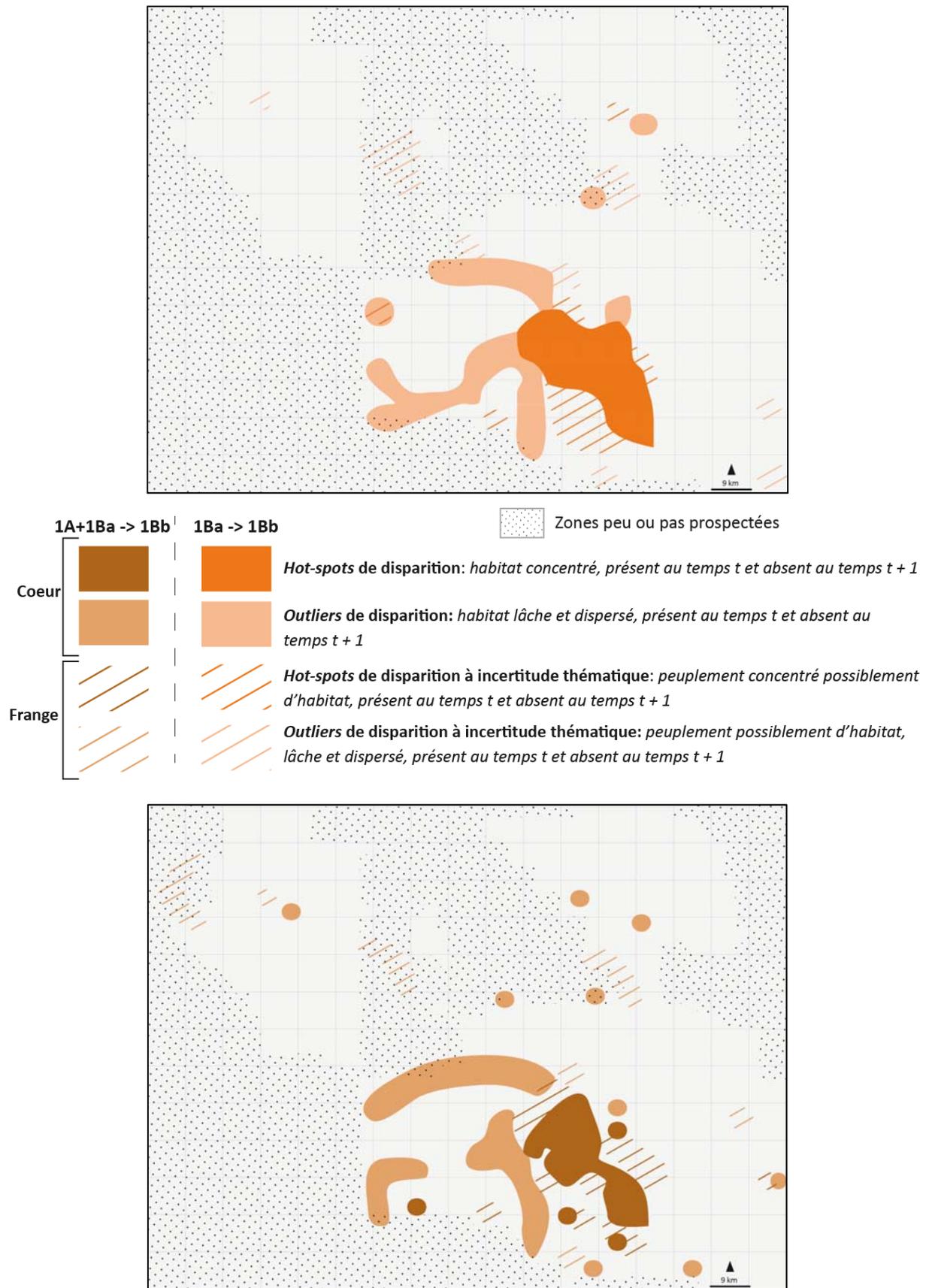


Figure 99 - Zones floues de disparition à partir de deux niveaux temporels

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 *outliers*) (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.

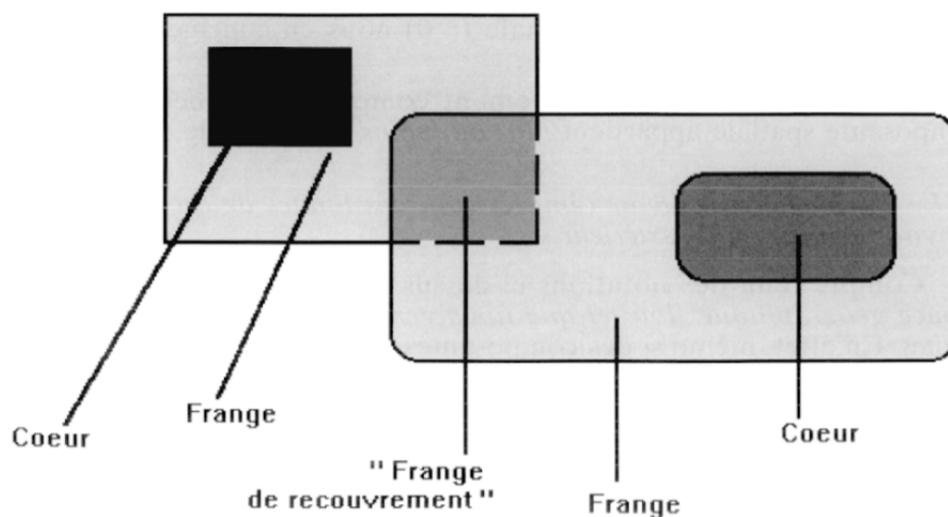


Figure 100 - Configuration d'un *espace géographique flou* (Rolland-May, 1996).

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.

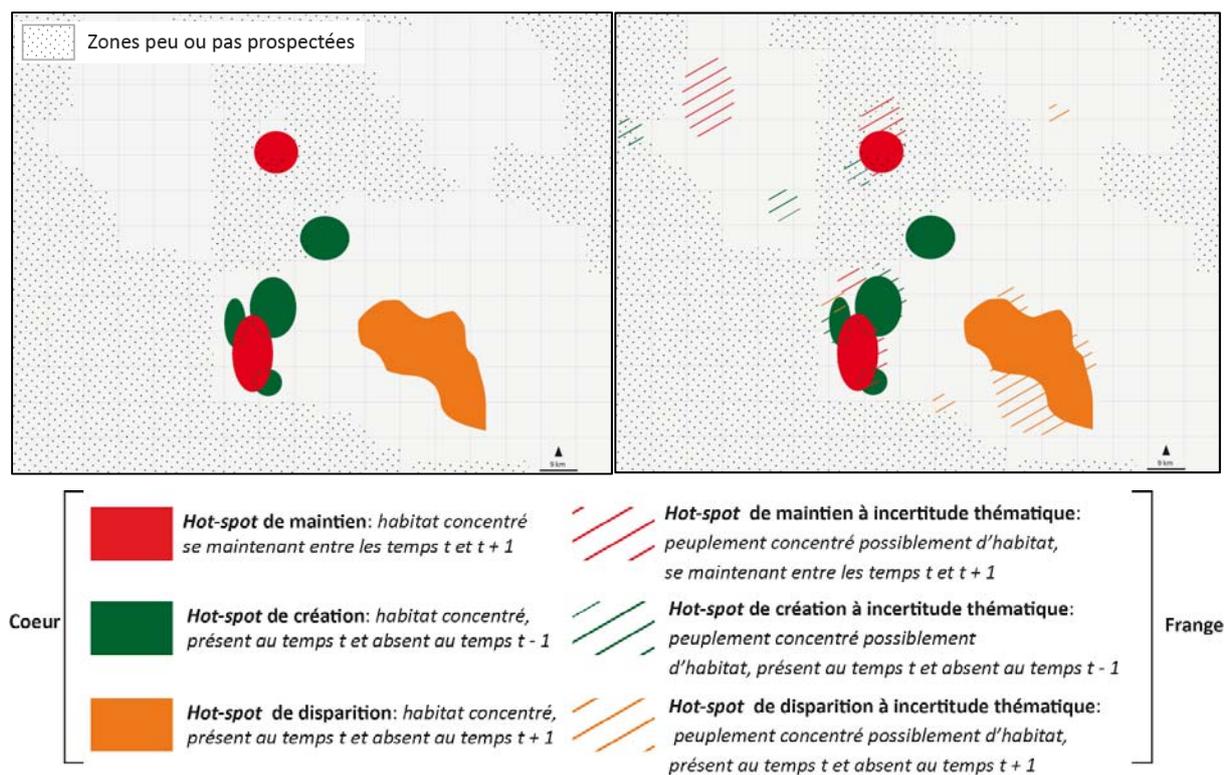


Figure 101 – Les *hot-spots flous* de changement ou de stabilité entre les temps 1Ba et 1Bb

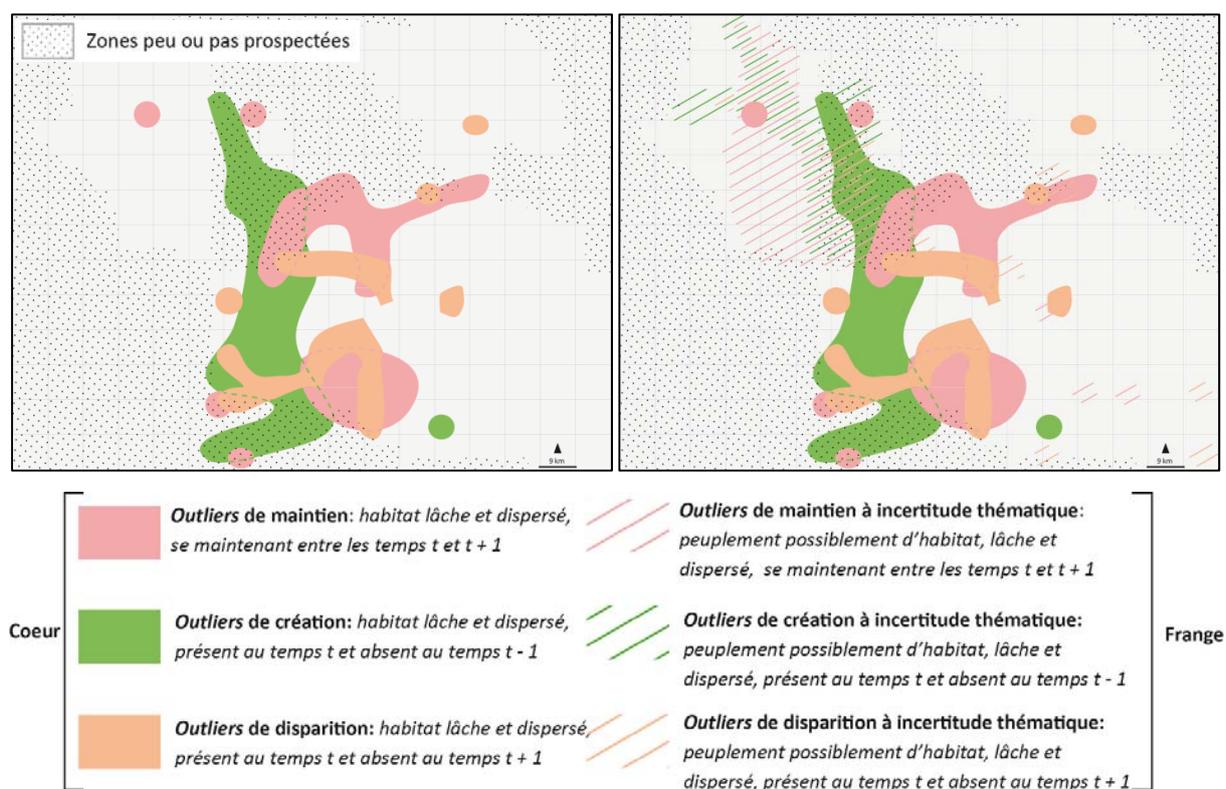


Figure 102 - Les *outliers flous* de changement ou de stabilité entre les temps 1Ba et 1Bb

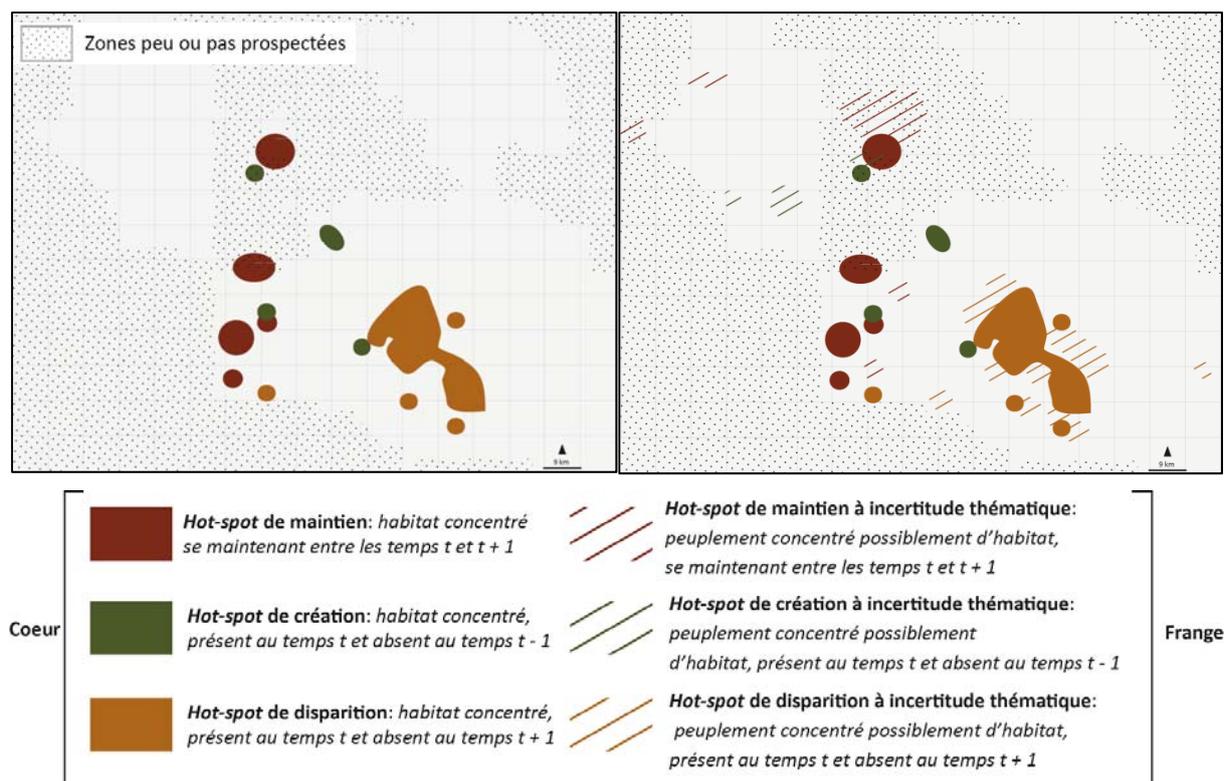


Figure 103 - Les *hot-spots flous* de changement ou de stabilité entre les *temps 1A+1Ba* et *1Bb*

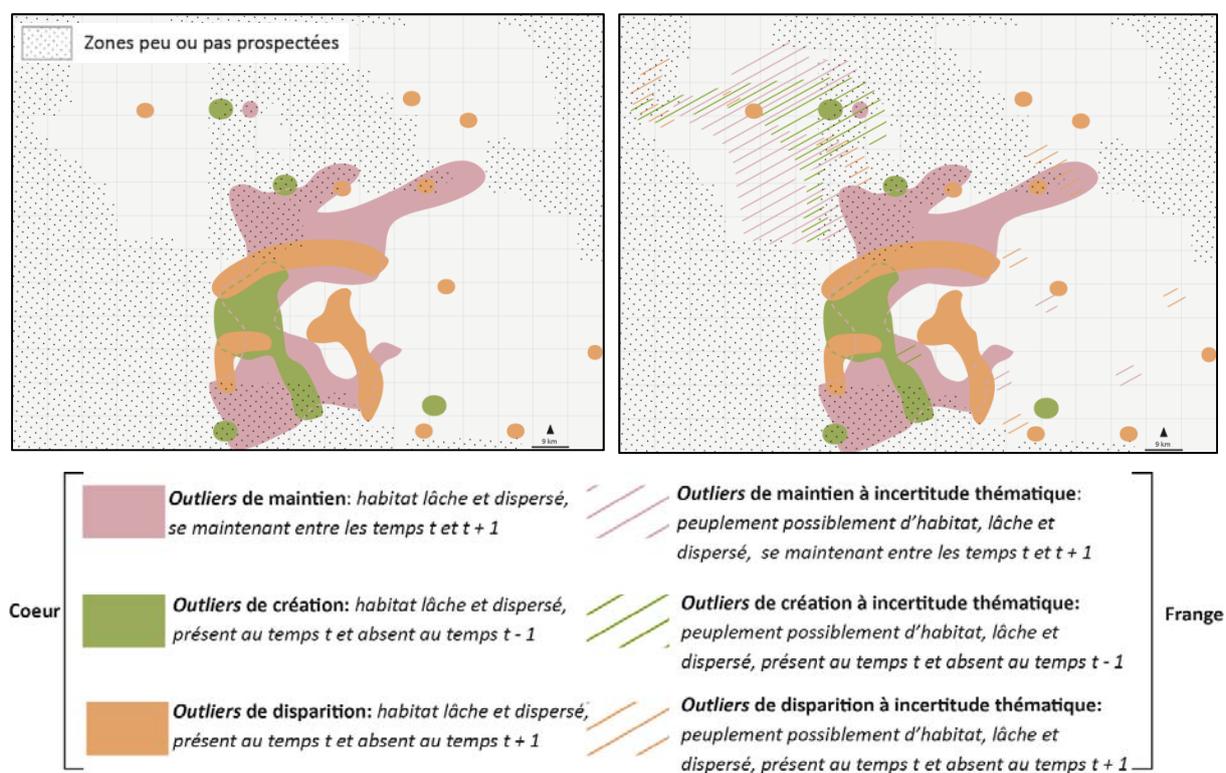


Figure 104 - Les *outliers flous* de changement ou de stabilité entre les *temps 1A+1Ba* et *1Bb*

Les *hot-spots* 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).

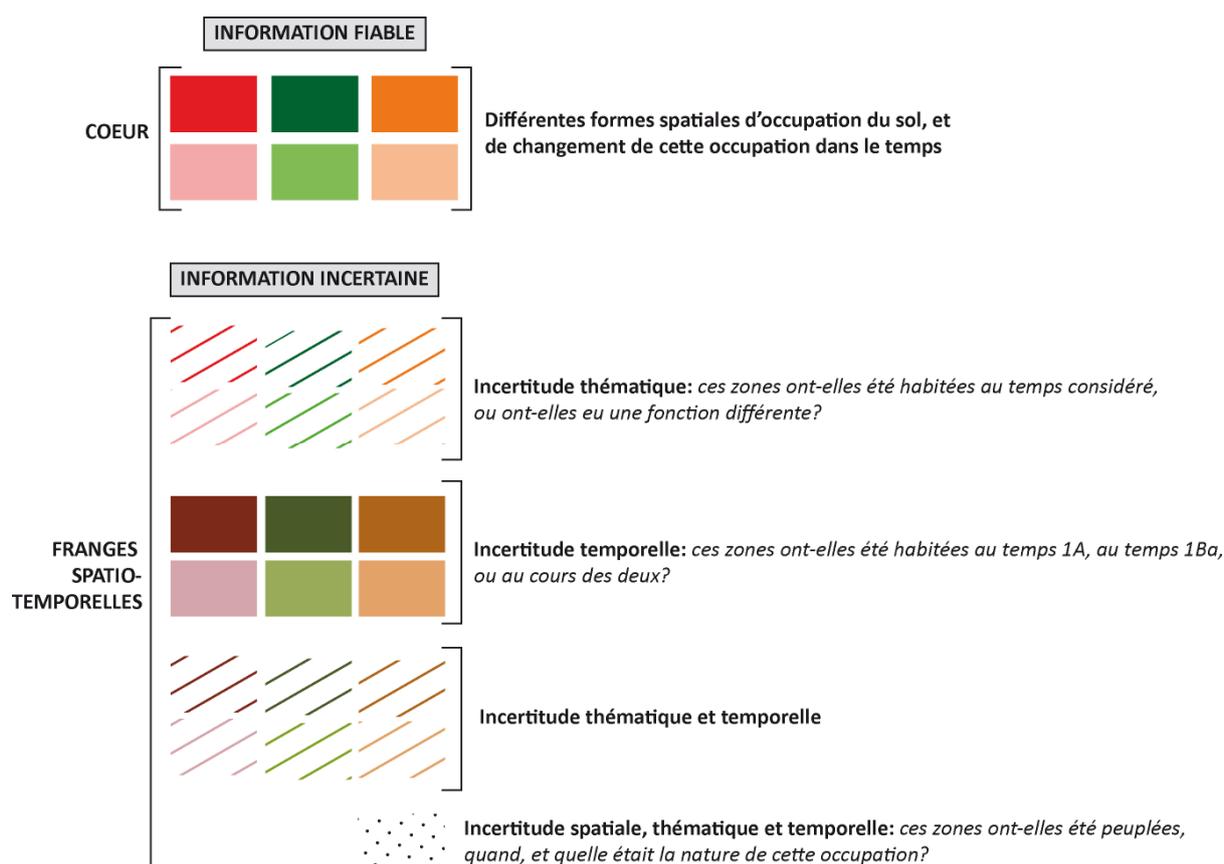


Figure 105 - Les divers niveaux d'information créés à cette étape du raisonnement.

## 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-ils 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 ?

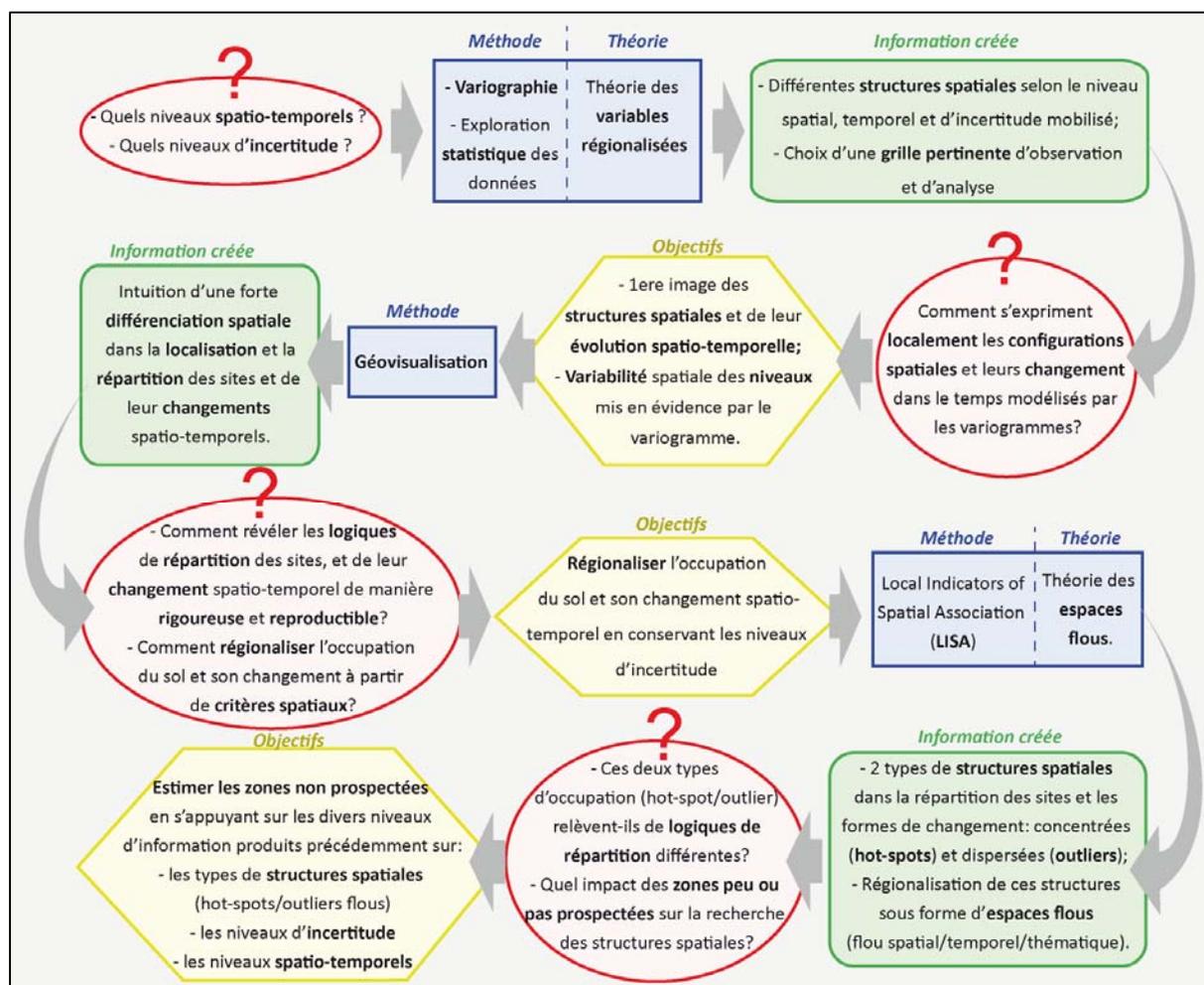


Figure 106 – Chaîne de raisonnement suivie dans le chapitre 1 de la partie III.