



UNIVERSITE  
DE TOULOUSE  
LE MIRAIL

GEODE  
GÉOGRAPHIE DE L'ENVIRONNEMENT  
UMR 5602 CNRS



**Université de Toulouse**  
**MASTER 2**

Mention  
Spécialité  
Parcours

**Géographie et Aménagement**  
**Géographie de l'Environnement et du Paysage**  
Modélisation spatio-temporelle des paysages et  
information géographique : aide à la décision, scénarii  
de gestion et d'aménagement

**Mémoire de Master 2**



ROUSSEL Virginie

Sous la direction de :  
Thomas Houet

Soutenu le 18/11/2014

## RESUME

La déprise agricole et la désindustrialisation des zones montagnardes ont entraîné de profonds bouleversements des écosystèmes. Avant les années 1950 et depuis plus d'un millénaire, les forêts subalpines pyrénéennes étaient exploitées intensivement pour les besoins en combustible et en zones de pâturages. A partir du milieu du XXe siècle, la croissance urbaine a été accompagnée par l'abandon des pratiques agro-pastorales et industrielles dans les zones montagnardes. Ce phénomène a déclenché le processus de recolonisation de ces espaces par la forêt non sans conséquences sur l'ensemble du système montagnard. Les acteurs du territoire ne sont pas unanimes pour considérer la fermeture des paysages sans rien faire.

Cette étude s'attache à analyser les dynamiques spatio-temporelles passées de la forêt subalpine de Pin à crochets dans la vallée de Bassiès, pour envisager le futur peuplement. Le travail consiste à comprendre les facteurs en jeu dans le processus de recolonisation enclenqué dans la vallée, pour simuler l'avenir de la forêt en 2050 par le biais de la modélisation prospective et dans un but opérationnel d'aide à la gestion.

L'analyse des dynamiques passées et de la littérature a permis d'identifier les variables actives dans le processus de recolonisation et modélisables par le logiciel de programmation de modèle NetLogo. Ces variables sont liées à l'âge de l'arbre, au vent, à l'altitude, et à l'occupation du sol.

Le scénario développé met en évidence les zones potentielles d'enforestement en 2050 selon une évolution tendancielle de la forêt. En perspective, il serait intéressant d'envisager la création de scénarios contrastés supposant un renouveau de l'agro-pastoralisme dans la vallée ou percevant les effets du dérèglement climatique sur les dynamiques spatio-temporelles de la forêt.

## ABSTRACT

The conjunction of agriculture decline and deindustrialization of mountain areas have contributed to deep changes in the ecosystem structures. Before the 1950s and for more than a millennium, Pyrenean subalpine forests were intensively exploited for the needs in wood fuel and pasturelands. From the mid-twentieth century, urban growth set with the desertion of grazing and industrial practices in mountain areas. This phenomenon led to a spontaneous forest regeneration which creates a land-use conflict between the different territory's stakeholders.

This study proposes to analyze past spatiotemporal dynamics of the subalpine forest of *Pinus uncinata* in Bassiès valley (Ariège, France) to predict the future stand. The work consists in understanding the factors involved in forest regeneration in order to simulate the future forest in 2050, thanks to prospective modeling, and to create an operational management tool.

Past dynamics and literature analysis allow to identify variables of regeneration system which can be modeled using the programming software NetLogo. These variables are the age of trees, wind, elevation, and ground vegetation.

The developed scenario highlights the potential forest areas in 2050 according to a trend evolution of forest. The perspective of this study is the production of contrasting scenarios taking into account the possible reintroduction of agropastoralism or the impacts of climate change on the evolution of the forest in the valley.

**MOTS-CLES :** Modélisation prospective, modèle individu-centré, *Pinus uncinata*, recolonisation de la forêt, scénario, télédétection

**KEY-WORDS :** Prospective modeling, individual-based model, *Pinus uncinata*, forest regeneration, scenario, remote sensing

## REMERCIEMENTS

Je suis très reconnaissante envers Thomas Houet pour ces deux années d'implication dans mon travail. Je le remercie pour l'ensemble du savoir et de l'expérience fourni et pour avoir écouté mes projets et su me proposer un travail à la hauteur.

J'adresse ma gratitude à Dominique Laffly pour son investissement important dans ce travail, me permettant de mieux appréhender les données de base et la statistique.

Je remercie de grand cœur Laure Vacquié pour la transmission de son savoir sur le logiciel NetLogo, sa disponibilité et son écoute.

Je remercie le Laboratoire Geode de m'avoir accueilli dans ces locaux et fourni les données et le matériel nécessaire à la réalisation de l'étude.

Je suis profondément reconnaissante envers à mon entourage qui a su m'aider dans la réalisation de ce travail et me soutenir lors des moments d'égarément. Un grand merci à Miguel, merci Delphine.

# Sommaire

RESUME .....	2
ABSTRACT .....	2
REMERCIEMENTS .....	3
ABREVIATIONS.....	6
INTRODUCTION .....	7
I. Etat des connaissances nécessaires à la création d'un modèle d'expansion de la forêt .....	10
A. Utilisation de différents outils pour caractériser les dynamiques spatio-temporelles de la forêt 10	
1. Percevoir le passé : la télédétection .....	10
2. Prédire le futur : la prospective.....	12
B. Identification des composantes du système complexe <i>Forêt</i> .....	15
1. Diversité et complexité des paramètres .....	15
2. Adaptation des facteurs explicatifs à une forêt de Pin à crochets.....	18
3. Processus de caractérisation de l'évolution de la forêt .....	20
II. Méthodologie utilisée pour créer une modélisation prospective de la forêt de Pins à crochets de la vallée de Bassiès .....	22
A. Site d'étude et données .....	22
1. Site d'étude .....	22
2. Données :.....	23
B. Méthodes d'analyse des dynamiques passées .....	26
1. La statistique univariée .....	26
2. La statistique multivariée .....	26
C. Adaptation du modèle TREELIM.....	29
1. Un modèle individu-centré fondé sur des paramètres écologiques et géographiques.....	29
2. Présentation du modèle TREELIM.....	31
3. Apports du modèle réalisé dans ce mémoire .....	32
D. Modélisation du peuplement de Pins à crochets dans la vallée de Bassiès.....	33
1. Présentation du modèle.....	33
2. La robustesse du modèle.....	39
3. Sensibilité des paramètres .....	40
4. Le scénario tendanciel.....	41
5. Indicateur de validité des simulations.....	41
III. Résultats .....	43
A. Analyse des dynamiques passées : les statistiques.....	43

1. Les statistiques simples :	43
2. L'analyse multivariée :	49
B. Calibrage du modèle	55
1. Test de robustesse	55
2. Tests de sensibilité des paramètres	57
3. Synthèse des indices de validité du modèle	66
C. Simulation d'un scénario prospectif	69
IV. Discussion	71
CONCLUSION	74
BIBLIOGRAPHIE	75
ANNEXES	78

## ABREVIATIONS

AC : Automate cellulaire

ACP : Analyse des composantes principales

AFC : Analyse factorielle des correspondances

CAH : Classification ascendante hiérarchique

DATAR : Délégation interministérielle à l'aménagement du territoire et à l'attractivité régionale

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

LUCC : Land use and cover changes

MNT : Modèle numérique de terrain

RTM : Restauration des terrains en montagne

SIG : Système d'information géographique

SMA : Systèmes multi-agents

## INTRODUCTION

Les forêts subalpines françaises sont les marqueurs d'une montagne humanisée depuis des siècles. Elles sont des lieux de richesse des écosystèmes en interactions avec les activités humaines.

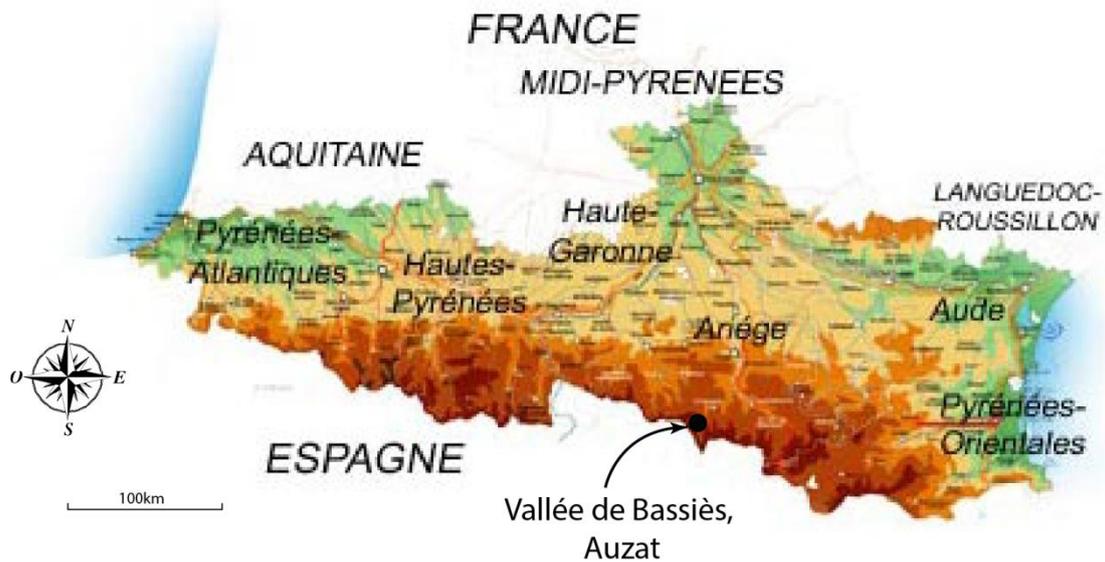
Ces forêts possèdent une grande diversité de la biocénose et les premières traces de leur exploitation remontent au I<sup>er</sup> siècle avant J-C (Cantegrel, 2014). Cette co-présence nature/société fait des forêts subalpines des zones d'enjeu socio-économique et environnemental fort. Les forêts subalpines représentent un potentiel agro-pastoral qu'il semble utile de mettre en valeur face à la déprise agricole observable depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Les usages ancestraux de la forêt subalpine sont multiples, du pastoralisme à la production de bois, aujourd'hui, seulement quelques forêts sont exploitées pour la filière bois. Cependant, de nouvelles activités telles que le tourisme de montagne se développent considérablement face à la périurbanisation grandissante des villes et au développement de l'attractivité de la nature comme lieu de tourisme, de loisirs, de repos et de calme. Il est nécessaire de préserver le patrimoine naturel de ces forêts pour un essor mesuré de ces pratiques.

La revue des activités en montagne atteste de la complexité du système *Forêt*. Lieu de richesse des écosystèmes et de ressources variées pour l'Homme, la forêt est un lieu où les interactions Homme/nature sont prégnantes. Cette caractéristique fait des forêts subalpines un système à la fois complexe et sensible. De manière naturelle, ces lieux sont soumis à des changements climatiques perpétuels dus à l'altitude, dont il est parfois difficile de s'adapter. Le dérèglement climatique accroît la sensibilité de ces écosystèmes en provoquant des situations climatiques extrêmes. Les conséquences du mode de vie humain se reflètent dans les impacts du changement climatique mais pas seulement. L'intervention de l'Homme dans un milieu naturel crée inconditionnellement un déséquilibre du système.

La complexité et la sensibilité du système des forêts subalpines mettent en évidence l'importance d'une gestion intégrée de ces espaces. Pour gérer un territoire, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement du système, d'en identifier les composantes naturelles et humaines pour appréhender leurs actions et leurs désirs. Cette approche de la gestion est possible par la prospective. Elle a pour but de mettre en avant des futurs possibles, souhaitables ou inacceptables en vue d'une gestion mesurée et intégrée du territoire.

Le travail de ce mémoire s'inscrit dans cet enjeu de gestion d'un système complexe et sensible. L'objectif de cette étude est de mettre en évidence les facteurs ayant une incidence sur l'évolution de la forêt de Pin à crochets de la vallée de Bassiès dans une visée opérationnelle d'aide à la gestion d'un espace en mutation.

La vallée de Bassiès est une ancienne vallée glaciaire des Pyrénées ariégeoises située à la jonction des influences océanique et méditerranéenne, dans la commune d'Auzat (figure 1).



*Figure 1 - Carte de localisation du site d'étude*

La vallée est située entre 1500m et 2676m d'altitude. Elle est caractérisée par un chapelet de lacs et une forêt ancienne de Pins à crochets. Cette essence est omniprésente dans les Pyrénées et forme l'unique espèce de la strate arborée des forêts subalpine. A Bassières, comme pour l'ensemble de la chaîne pyrénéenne, la forêt de Pins à crochets a été soumise à des variations dues à l'activité anthropique. L'agro-pastoralisme et la métallurgie sont des activités qui ont marquées les Pyrénées depuis un millénaire. L'utilisation des arbres comme combustible et les pâturages pratiqués sur les estives ont entraîné la quasi-disparition du pin à crochets dans la vallée de Bassières (Cantegrel, 2014). Néanmoins, la déprise agricole et la désindustrialisation des zones montagnardes ont entraîné le processus de fermeture des paysages par la recolonisation du Pin à crochets (document 1).



la situation en aval du lac de l'Escale en 1976  
© F. Taillefer



la même situation en 2009  
© D. Galop CNRS

*Document 1 – Recolonisation de la vallée de Bassiès par le Pin à crochet entre 1976 et 2009 (Cantegrel, 2014)*

La mutation de cet espace entraîne des conséquences sociales et environnementales fortes. La recolonisation de la forêt est favorable au développement de la richesse de l'écosystème présent. Néanmoins, les habitants qui pratiquaient le pastoralisme dans la vallée ne sont pas pour la fermeture des paysages qu'ils voient comme la perte de leur patrimoine. Le processus de recolonisation forme aussi une barrière au développement du tourisme, en effet des forêts trop denses ne sont pas propices aux pratiques touristiques.

C'est au sein de ce conflit d'usage qu'intervient la nécessité de mettre en place une gestion intégrée de l'espace. Elle peut alors consister en la proposition de futurs envisageables pour permettre aux acteurs du territoire d'avoir une image de leur territoire dans l'avenir et de mieux appréhender leurs désirs et leurs besoins.

Ce mémoire de recherche propose un modèle d'expansion du Pin à crochets dans la vallée de Bassiès. Cette étude comprend l'identification des composantes du système complexe *Forêt* grâce à de nombreux travaux réalisés notamment au sein de l'Observatoire Homme/Milieu mis en place sur le Haut-Vicdessos, l'analyse de ces facteurs par le biais des statistiques et la création d'un scénario des zones potentielles d'enforestement selon l'évolution tendancielle de la forêt en 2050.

## I. Etat des connaissances nécessaires à la création d'un modèle d'expansion de la forêt

Un travail tel qu'une modélisation demande l'acquisition d'un ensemble de connaissances et d'une démarche méthodologique précise permise par l'étude de la littérature.

### A. Utilisation de différents outils pour caractériser les dynamiques spatio-temporelles de la forêt

#### 1. Percevoir le passé : la télédétection

L'imagerie aérienne et satellitale a permis un avancement considérable de la connaissance et du suivi des surfaces terrestres pour des domaines scientifiques variés tels que la médecine, la biologie, la minéralogie, la robotique ou la géographie (Caloz et Collet, 2001). Cette technique applicable à différentes sciences admet un consensus autour de sa définition :

*La télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, "d'observer" et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci. Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption, etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle foliaire, phyto-masse, matière organique du sol,...), etc.<sup>1</sup>*

Le traitement d'image a précédé les SIG et a été un moteur pour leur développement. Le développement rapide des missions aériennes dans les années 1950 a permis la création de programmes civils de lancements de satellites dans les années 1970 (Morant, 1999). En 1972, le premier satellite pour l'étude des ressources terrestre est lancé, c'est Landsat 1, anciennement appelé ESR 1 (Colaz et Collet, 2001).

Avant les images satellitales, les images utilisées pour l'analyse de la surface terrestre étaient des photographies aériennes prises à partir d'avions. Ces images sont analogiques et leur analyse est réalisée par photo-interprétation en fonction des tons, des couleurs, des textures et des structures des nuances de gris ou de couleurs.

Les images satellitales ont facilité l'interprétation des images par assistance de l'ordinateur. Elles sont une transposition d'une image analogique en valeurs numériques, c'est-à-dire que chaque pixel comprend un compte numérique définissant la luminance ou la réflectance (pourcentage du rayonnement incident) de la surface observée dans le pixel<sup>1</sup> (Colaz et Collet, 2001).

Les applications de la télédétection sont très diverses : études sur l'érosion des sols (Bou Kheir et al., 2001), études des surfaces maritimes (Elfouhailiy Tanos, 1996) ou encore l'étude des couverts végétaux (Picard, 2002). En effet, l'imagerie satellitale permet de visualiser des éléments non visibles à l'œil-nu. Les capteurs peuvent enregistrer des longueurs d'ondes hors du visible tel que l'infrarouge comme le montre la figure 2.

---

<sup>1</sup> Note de cours : Introduction générale à la télédétection, Soudani Kamel, Maître de Conférences, UMR 8079 CNRS-Université Paris-Sud XI

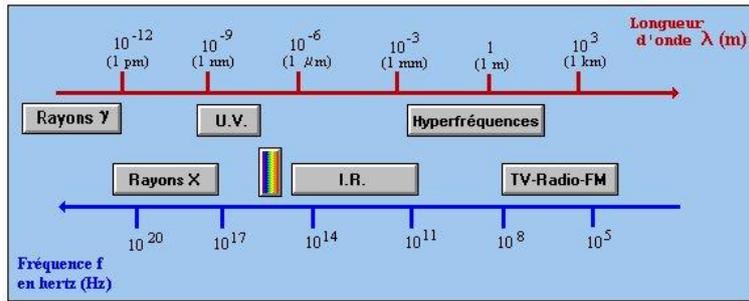


Figure 2 - Spectre du rayonnement électromagnétique (I.R. est l'infrarouge).  
Source : Météo France

Le capteur est capable d'enregistrer le rayonnement électromagnétique du couvert végétal dans l'infrarouge, des informations peuvent alors être dégagées, notamment sur la teneur en eau du végétal. Pour être intelligible, l'information est retransmise en couleurs visibles, la figure 3 donne un exemple d'image prise en infrarouge dans la vallée de Bassiès.

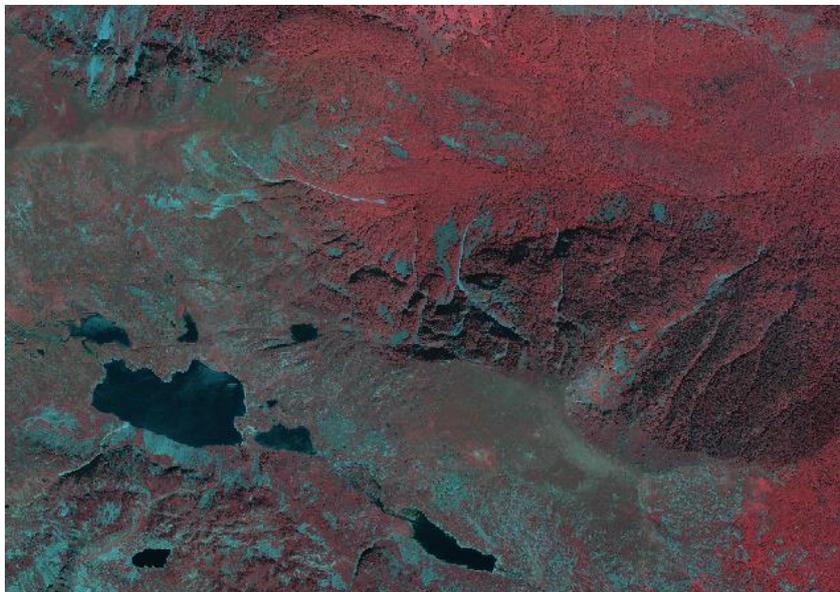


Figure 3 - Photographie en IRC (infrarouge couleur) de la vallée de Bassiès en Ariège

Les couleurs attribuées permettent d'identifier la végétation de type Feuillus (rouge vif), des conifères (rouge foncé), des zones minérales (bleu) et des surfaces en eau (noir). La variation de la réflectance dans les pixels aide, ensuite, à l'identification du type de végétation par photo-interprétation.

Grâce à l'interprétation assistée par ordinateur, il est courant de créer des classifications de l'occupation du sol à partir d'images satellitales ou aériennes.

Le but du traitement d'image est, donc, d'extraire des informations utiles à la compréhension et la modélisation de phénomènes se déroulant sur la surface terrestre. Son principal atout est le traitement rapide d'une grande surface terrestre (Colaz et Collet, 2001). En parallèle, l'évolution rapide des SIG accentue le recours à l'image.

Dans ce mémoire, l'intervention de la télédétection est essentielle pour obtenir des informations sur l'état passé de la forêt étudiée.

## 2. Prédire le futur : la prospective

La réflexion prospective amène à s'interroger sur le devenir d'un élément constitutif d'un système ou du système dans sa globalité. La prospective est donc l'étude des potentiels changements, et propose alors de penser l'avenir comme étant construit et non écrit (Delamarre et Malhomme, 2002). La prospective est une démarche scientifique mise en place dans les années 1950 par la création du concept de prospective par Gaston Berger. C'est à partir des années 1970 que la prospective devient appliquée. En 1972, le rapport Meadows développe un modèle de simulation visant à prédire l'avenir quant à la raréfaction des ressources et le développement de catastrophes naturelles. Au cours de la même période, la démarche prospective introduit par le rapport Meadows est réutilisée en aménagement du territoire (Houet, sous presse). Cette démarche est caractérisée par la production de scénarios envisageant les possibles devenir du système étudié.

Cette partie vise à mettre en relief les champs, les démarches et applications possibles de la prospective spatiale pour évaluer la contribution du modèle produit dans cette étude.

- La prospective en géographie

La géographie est une science emplies de doutes épistémologiques depuis les années 1950. Elle est tiraillée entre science dure (géomorphologie, climatologie etc.) et science sociale (géopolitique, démographie etc.). L'étude de la Terre peut paraître généraliste et peu spécifique. Le géographe remet alors sans cesse en question son savoir et la place de sa science.

Cependant, la géographie contemporaine ne se contente pas de décrire les phénomènes terrestres, elle s'interroge sur les interactions entre les agents. La force de la géographie réside dans l'approche systémique des phénomènes. Ainsi, par l'entrée spatiale, la géographie est capable d'analyser la complexité (ou globalité) des processus en prenant en compte un maximum de facteurs explicatifs pour mettre en évidence celui ou ceux qui peuvent créer la rupture ou ceux qui sous-tendent la structure du système.

Le développement de la prospective est alors un terrain de jeu idéal pour les géographes. En effet, envisager les futurs possibles implique la prise en compte d'un ensemble complexe de phénomènes ayant un impact sur le processus étudié (Godet 1986). L'approche spatiale induit par la géographie permet la prise en compte d'une grande quantité de facteurs explicatifs et l'illustration des futurs possibles sur le territoire.

La prospective en géographie est introduit par les Travaux de prospective réalisés par la DATAR. Cette étude utilise une démarche de prospective stratégique pour mettre en évidence les futurs possibles du territoire français en 2000. Alors que la DATAR produit ces scénarios en 1972, la prospective territoriale n'est créée qu'à partir des années 1990, elle représente une forme de prospective stratégique (Godet et Durance, 2011). Ce champ prospectif implique une démarche normative visant à concevoir un futur réalisable ou non et analyser les processus qui mèneraient à cet état, les scénarios de 1972 de la DATAR sont une illustration de cette démarche (Emsellem et al, 2012).

La prospective spatiale, développée dans les années 2000, intègre l'espace comme agent (Emsellem et al, 2012). Les phénomènes et facteurs en jeu sont spatialisés pour comprendre la sensibilité de l'espace aux changements. La géoprospective, champ de recherche en construction, attribue, aussi, à l'espace une place centrale, de l'identification des dynamiques spatio-temporelles à l'intégration des interactions multi-échelles et la simulation spatialement explicite (Houet, sous presse). Cette approche tente de mettre en évidence les

lieux de fractures, les zones sensibles au changement dans une démarche participative de création de scénarios. L'espace n'est pas seulement un support de localisation des changements mais un agent dans les changements (Emsellem et al, 2012) et un outil didactique et constructif. La prospective spatiale et la géoprospective s'appuient sur des scénarios exploratoires du futur.

- La modélisation prospective

Il existe différentes méthodes d'exploration des futurs, et la modélisation prospective représente une méthode adaptée à la démarche géographique. La géoprospective tente de mettre en évidence les interactions spatiales entre différents facteurs identifiés (naturels ou anthropiques). La complexité des interactions peut mener à une modélisation inopérante, inadaptée et/ou incomplète (Houet, sous presse). Néanmoins, un modèle est une représentation simplifiée de la réalité et son incapacité à représenter une dynamique ou un facteur donne tout de même des indices sur l'impact de ces composantes dans le système étudié.

En géographie, le développement de l'analyse spatiale a permis de lier modélisation et scénarios prospectifs spatialisés. En effet, les travaux d'analyse spatiale contribuent à l'étude des interactions et des positions relatives des lieux et des relations au sein d'une approche systémique (Voiron, 2006). Ainsi, les modèles peuvent estimer le rôle joué par les composantes spatiales en fonction de leurs interactions.

L'étude des changements d'occupation et d'usages des sols (LUCC) a permis l'évolution des modèles de simulations des changements (Houet, sous presse). En effet, l'évolution des occupations et usages des sols représente un enjeu fort dans un monde en perpétuelle croissance démographique impliquant des besoins en ressources pour l'alimentation mondiale, les activités économiques et le logement des populations. Les travaux portant sur les LUCC permettent de développer des outils d'aide à la gestion pour les acteurs territoriaux. Ces outils sont très utiles en montagne, zones marquées par des changements socio-économiques forts ayant des impacts rapides et parfois violents sur les écosystèmes locaux. La création de scénarios permet d'anticiper certains phénomènes et donc de mettre en place une gestion adaptée pour préserver la valeur d'un patrimoine ou restructurer un espace abandonné.

#### *Démarche prospective :*

La prospective est un champ d'étude mais aussi une méthode en elle-même. Godet (1986) a conceptualisé une démarche méthodologique propre à l'ensemble des champs de la prospective par la production de scénarios (Houet, sous presse) :

- La première étape de la démarche consiste à la construction de la base regroupant l'identification des variables internes et externes au système étudié (facteurs explicatifs des changements), la caractérisation de la dynamique passée du système et les enjeux futurs (hypothèses)
- La construction des scénarios reposant sur la définition d'hypothèses pour chaque facteur étudié
- Evaluation et comparaison des conséquences des scénarios pour définir des préconisations, règles ou mesures de gestion du système par les acteurs.

La troisième phase de la démarche de modélisation prospective consiste à valider les dynamiques simulées par le processus de prédiction des futurs possibles. Dans le cadre de la prospective, la validation semble compliquée puisqu'elle implique la connaissance de l'état

futur du système analysé (Houet, sous presse). La modélisation exploratoire des futurs induit la connaissance de la dynamique passée. La validation consiste alors à simuler le phénomène étudié sur une période de temps passée pour analyser les concordances (Voiron, 2006).

Il existe différents types de scénarios en fonction de la démarche prospective utilisée. Les scénarios normatifs se distinguent des scénarios exploratoires par leur construction. Les premiers sont issus d'une vision du futur possible et mettent en évidence les comportements du système pour arriver à ce futur. Les seconds sont construits à partir d'une situation connue donc passée et cherche à percevoir l'avenir à partir d'un passé. On différencie aussi les scénarios tendanciels des scénarios contrastés. Les premiers présentent l'avenir « au fil de l'eau », ils poursuivent les dynamiques passées et présentes sans fractures ou ruptures. Les derniers scénarios envisagent les possibilités de rupture d'un système et les conséquences spatiales.

Il existe plusieurs types de modélisations prospectives liées à des finalités du modèle différents (Houet, sous presse). La modélisation réaliste de systèmes dynamiques et complexes empreints à des évolutions spatiales est aujourd'hui couramment réalisée par des modèles de types : individu-centré, stochastiques ou par réseaux neuronaux (Basse, 2010). Les réseaux neuronaux permettent la représentation dynamique des phénomènes, ce sont des modèles d'évolution, et la détermination de la morphologie des objets/phénomènes étudiés (Basse, 2010). En géographie ils permettent, notamment, de localiser les changements détectés sur un territoire.

Les modèles stochastiques reposent sur une ou plusieurs équations qui calculent le niveau de précision des changements observés (Basse, 2010). Ce sont des modèles mathématiques faisant appel à des variables aléatoires pour simuler les évolutions. Ils sont couplés avec d'autres types de modèles tels que la modélisation individu-centrée.

Les modèles individu-centrés (choisis dans ce travail) englobe les Systèmes multi-agents (SMA) et les automates cellulaires (AC) (Basse, 2010). Le fondement de ce type de modélisation repose sur la détection de l'organisation et des actions des individus pour faire émerger une structure globale. Bonadeau (2002) a défini le concept, définition qui fait consensus :

*« Dans la modélisation individu-centrée, un système est modélisé comme une collection d'entités autonomes, les "individus". Chaque individu dispose d'informations sur son environnement local (perceptions), ces informations sont traitées par un ensemble de règles de décision pour produire une action qui va modifier en retour l'environnement local (celui-ci pouvant être composé de ou contenir d'autres individus). Les "perceptions", "actions" et "règles de décision" peuvent être très diverses en fonction du système que les individus représentent. La répétition des interactions entre les individus est le cœur de la modélisation individu-centrée qui utilise des outils automatiques pour explorer les dynamiques de ces interactions, dynamiques hors de portée des outils mathématiques classiques. »<sup>2</sup>*

La différence entre les SMA et les AC réside dans le choix du déterminisme d'entrée. Le choix d'un modèle de type SMA conduit à considérer le comportement des agents comme déterminant l'organisation et le fonctionnement des dynamiques. Alors que, choisir un AC sous-entend que l'on considère la structure de l'espace étudié comme explicative des comportements des individus.

---

<sup>2</sup> Cette définition est relayée par Beslon (2008)

Le modèle créé dans ce travail envisage les futurs plausibles d'une forêt de Pins à crochets dans une vallée en altitude (Pyrénées ariégeoises). Le choix est fait de considérer les arbres comme des individus ayant un pouvoir, celui de se reproduire. On peut ainsi penser que la modélisation utilisée doit être de type SMA. Or une forêt est un système complexe dont l'évolution dépend aussi de facteurs extérieurs au comportement de l'arbre et intrinsèques à son environnement. La modélisation choisie pour caractériser l'évolution de la forêt est alors hybride, elle tente de mettre en exergue l'importance du comportement individuel des arbres et l'influence de l'espace dans les dynamiques spatio-temporelles. Cette hybridation est possible grâce à l'utilisation de logiciel de modélisation permettant l'écriture complète de modèle. Ces logiciels de modélisation sont issus de l'informatique et plus particulièrement de la programmation. A l'inverse des plateformes de modélisation telles que LMC (Idrisi), ils permettent une mainmise totale des changements modélisés et la lisibilité de la procédure. Le logiciel Netlogo permet de modéliser les comportements des individus (nommés turtles) au sein d'un espace (patches) ayant des caractéristiques propres et donc une incidence sur les changements.

Ainsi, la symbiose des techniques de télédétection et de modélisation prospective permettent d'explorer le futur. « Le futur ressemble rarement au passé » (Godet, 1986) mais les dynamiques passées donnent des pistes de lecture des phénomènes. Celles-ci doivent être couplées avec la prise en compte d'un maximum de facteurs explicatifs, car un système sensible tel qu'une forêt peu être soumis à la variation infime d'un paramètre. Les scénarios sont alors des outils de gestion des composantes du système apportant des solutions à certains systèmes menacés.

## B. Identification des composantes du système complexe *Forêt*

Analyser le comportement individuel des arbres pour comprendre la structure globale de la forêt voire du paysage, demande une approche à la fois écologique et géographique.

### 1. Diversité et complexité des paramètres

L'étude de la littérature montre que de nombreux travaux en écologie étudient l'évolution des forêts. Or la plupart des modélisations produites sont spatialement explicites. Elles utilisent donc une approche écologique sous-tendue par une démarche géographique, comme l'illustre le tableau 1.

Tableau 1 - Identification des paramètres utilisés dans différentes modélisations de l'évolution de la forêt

Facteurs explicatifs de l'évolution de la végétation		Landis, Scheller et al, 2008	Wallentin et al, 2008	Hörsch, 2003	Tappeiner et al, 1998	Sagnard et al., 2007	SMA : Modéliser les dynamiques paysagères pour accompagner un projet d'aménagement du territoire (Etienne et Le Page, 2002)
Facteurs topographiques	Pente			X	X		X
	Occupation du sol	X	X			X	X
	Altitude		X	X	X		X
	Orientation			X			X
	Rugosité			X (MNT)			
	Zone de drainage/Erosion				X		
	Profondeur du sol						
	Géologie						
Facteurs écologiques	Age de l'arbre/taille	X	X			X	X
	Dispersion/nombre de graines (fécondité)	X	X			X	
	Distance à l'arbre semencier le plus proche		X			X	
	Croissance de l'arbre		X				
	Concurrence entre les types de végétation		X			X	X
Facteurs climatiques	Vent	X	X	X (induit par le MNT)			X
	Température		X	X (induit par le MNT)			
	Ensoleillement			X (induit par le MNT)	X		
	Neige			X (induit par le MNT)			
	Humidité du sol			X (induit par le MNT)	X		
Perturbations	Anthropiques	X		X (usages des sols)	Usages des sols et accessibilité		X (usages des sols)
	Feu	X					
	Insectes/Oiseaux	X					

	Changements climatiques	X	X (Remontée en altitude de la forêt)				
	Avalanches						
	Maladies						
Facteurs sociaux : Implication des acteurs du territoire	Agriculteurs						X
	Naturalistes						X
	Forestiers						X
Modélisation	Scénarios	Plateforme de modélisation	Quatre scénarios	Modèle statique	Evaluation des changements d'usages des sols		Quatre scénarios
	Logiciel	Landis	NetLogo				Cormas (AC)
Site	Echelle	Multi-échelle	Macro-locale (1km <sup>2</sup> )	Régionale (300km <sup>2</sup> )	Locale (5km <sup>2</sup> )	Macro-locale (moins de 200m <sup>2</sup> )	Locale
	Lieu		Alpes centrales (Autriche)	Alpes suisses	Vallée de Passeier, Nord de l'Italie	Mont Ventoux	Causse Méjean
	Essences étudiées	Tout type de forêt peut être intégré	Epicéas	Forêt subalpine : mélèze et arole Forêt de montagne : chêne	Modèle LUCC. Simulation de l'ensemble de l'évolution de la végétation.	Sapin blanc et hêtre commun	Pin sylvestre et pin noir

Au regard de la littérature sur la modélisation de la forêt, on comprend la complexité des facteurs en jeu dans l'évolution du système.

La première référence étudiée présente les capacités de développement de modèle d'une plateforme de modélisation appelée Landis. Les simulations réalisées à partir de Landis tentent de mettre en évidence les dynamiques spatio-temporelles de différents types de forêts. L'accent est porté sur la prise en compte des perturbations anthropiques et naturelles dans l'évolution de la forêt plutôt que des facteurs topographiques et écologiques.

Les quatre références suivantes sont des modélisations écologiques. Leur but est de comprendre le fonctionnement interne des types de végétation étudiés pour un espace donné ayant des caractéristiques propres et jouant un rôle dans le développement de la forêt. L'ensemble des modélisations utilise alors des facteurs topographiques, ce qui rend les modèles spatialement explicites. Les autres facteurs explicatifs identifiés sont des paramètres climatiques et écologiques.

La dernière référence citée dans le tableau 1 est une simulation multi-agents par automate cellulaire réalisée grâce au logiciel Cormas. Dans ce cas d'étude, la modélisation de l'évolution de la forêt n'est pas une finalité. L'objectif est la concertation des acteurs du territoire face à différents enjeux futurs possibles. L'accent est donc porté sur l'impact des politiques menées sur les paysages.

La synthèse d'une partie des travaux portant sur l'évolution des forêts met en évidence la multitude de facteurs en jeu dans ce processus et la complémentarité des modèles réalisés. La pluralité des approches atteste de la difficulté de prendre en compte la totalité des facteurs explicatifs pour plusieurs raisons : chacun possède sa spécialité scientifique, les données ne sont pas toujours disponibles, les échelles d'étude apportent des approches différentes et les objectifs de la modélisation sont variés.

Les modélisations examinées ne sont pas forcément prospectives. L'objectif est souvent hors de la prédiction du futur mais plutôt centré sur la compréhension des dynamiques et des facteurs en jeu.

## 2. Adaptation des facteurs explicatifs à une forêt de Pin à crochets

Comprendre l'écologie du pin permet de mettre en lumière les facteurs internes et externes au pin, favorisant ou défavorisant son développement.

Le Pin à crochets étant l'essence arborée prépondérante des Pyrénées (Riou-Nivert, 2001), différents travaux ont été réalisés pour étudier son développement. La synthèse effectuée par Haunold (2014) est reprise pour connaître les paramètres externes au pin ayant une incidence sur son développement (document 1).

- Ecologie du Pin à crochets

		Facteurs limitant		Facteurs favorisant	
Orientation		Versant Nord	Versant Sud	Versant Nord	Versant Sud
Climatologiques	Température	Gel hivernal ⑦	Sécheresse estivale ①	?	Hautes températures en Mai et Août ⑤⑩
		?			Faibles température en Septembre ⑤
	Pluviométrie	?		?	fortes précipitations en Avril ⑤⑩
	Neige	?	?	Limite l'impact du gel ⑤	?
	Vents	?	Favorise la dessiccation ⑤	?	?
<b>Pédologiques / Edaphiques</b>	Humidité du sol	?	?	Favorise l'implantation des semis ⑤	
<b>Géographiques</b>	Altitude	Limite haute des peuplements ⑦		Favorise l'implantation des semis entre 1200 et 1600m ①	
<b>Biologiques / Autécologie</b>	Luminosité	Espèce héliophile stricte ④⑤⑨			
	Compétition	Espèce pionnière, mauvaise compétitrice ④⑤⑨			
		Milieux fermés ⑤⑧⑨		Milieux ouverts ④⑤⑨	
	Végétation herbacée	/	/	Protège les semis ⑤⑧⑨	
Végétation arbustive	Dense ⑤⑨		?	Eparse ②⑤⑨	
<b>Autres</b>	<b>Krummholz</b>	Denses ⑤⑨		?	Epars ②⑤⑨
	Mycorhizes	/	/	Symbiose favorable à la pousse des semis ③	

*Document 2 - Synthèse des facteurs externes au pin ayant une influence sur son développement. Les numéros correspondent aux références bibliographiques, les « ? » indiquent que l'information n'a pas été trouvée et les « / » représentent les facteurs n'ayant pas d'influence sur le pin (Haunold, 2014)*

Le principal facteur interne ayant une influence sur le processus de recolonisation du Pin à crochets est la production de graines par arbre. Des études ont permis de mettre en lumière les quantités de graines produites et la viabilité de ces graines. L'âge de l'arbre est décisif dans la quantité de graines fécondées produites par un arbre. Perrier (2014) explique qu'un Pin à crochets ne produit pas de graines fécondées avant 12 ans. Viglas et al. (2013) mettent en évidence, par une étude sur la germination des graines, la viabilité des graines produites par un arbre mature. Entre 12 et 30 ans, seulement 50% des graines sont viables, le

pourcentage augmente à 90% pour un arbre ayant entre 30 et 150 ans, au-delà 50% des graines produites seraient viables.

En résumé, les principaux facteurs influençant le développement du Pin à crochets sont :

- Les températures
  - Le vent
  - L'altitude
  - L'ensoleillement
  - La compétition avec la végétation environnante
  - L'âge de l'arbre.
- 
- Impacts anthropiques sur la dynamique du Pin à crochets

L'exploitation des pinèdes a eu un impact fort dans l'histoire du Pin à crochets des Pyrénées ariégeoises. Depuis le Néolithique, les estives pyrénéennes sont utilisées pour faire paître le bétail. Les études polliniques montrent que l'activité agro-pastorale a eu un impact fort sur l'abaissement de la limite altitudinale des forêts de pins. L'exploitation du Pin à crochets comme combustible remonte au I<sup>er</sup> siècle avant J-C. Cette activité a presque éradiqué le Pin à crochets de certaines zones de la chaîne pyrénéenne (Cantegrel, 2014).

Aujourd'hui, la désindustrialisation des Pyrénées et la déprise agricole ont largement réduit l'utilisation du Pin à crochets. Il est utilisé comme bois de protection contre les risques naturels (reboisements RTM) et exploité dans la production de bois, notamment dans les Pyrénées catalanes (Cantegrel, 2014).

L'abandon de l'agro-pastoralisme, la création de bois de protection et la production de bois ont donc un impact sur les dynamiques spatio-temporelles du Pin à crochets.

### 3. Processus de caractérisation de l'évolution de la forêt

La démarche et les outils nécessaires la création d'une modélisation prospective mis en évidence par l'étude de la littérature sont schématisés par la figure 4.

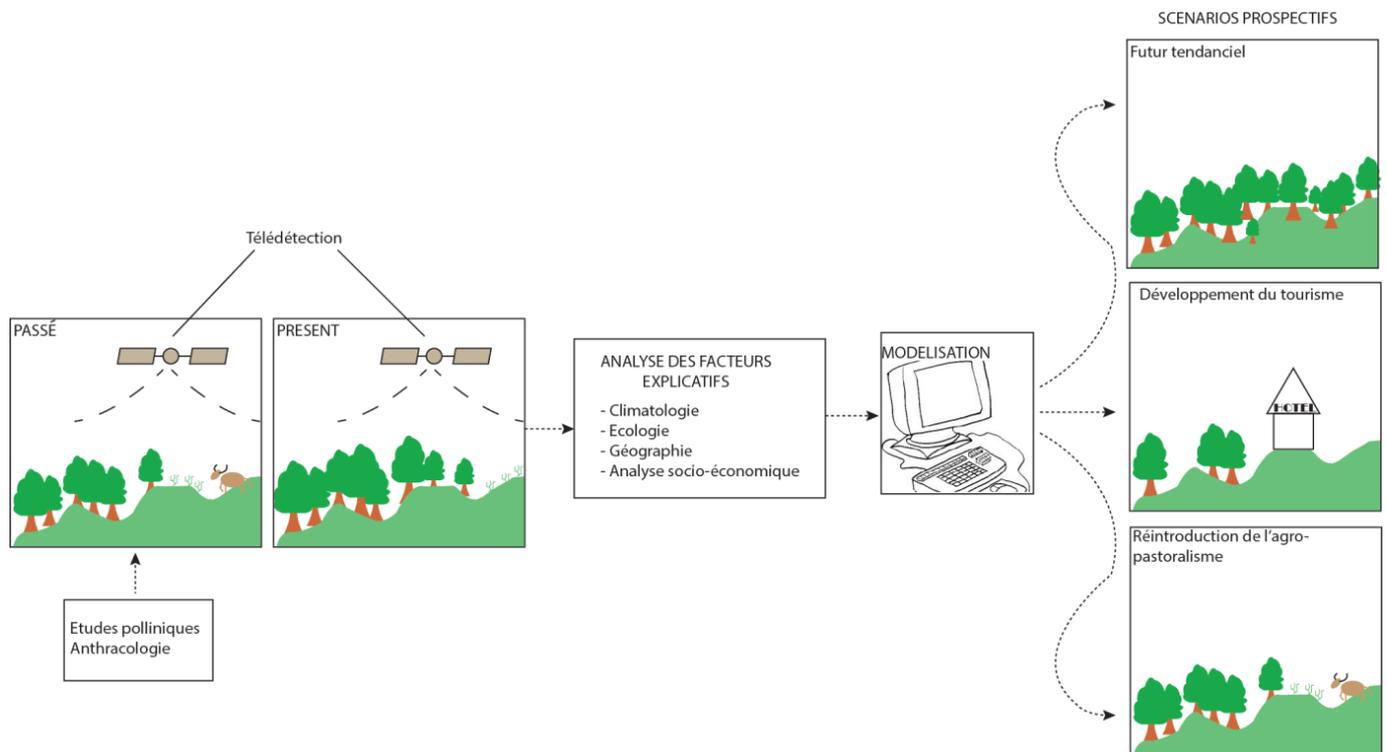


Figure 4 – Synthèse de la démarche de modélisation prospective

La première étape de la démarche consiste à identifier les dynamiques spatio-temporelles passées. Plusieurs outils sont mis au point pour révéler le passé en fonction du processus étudié, la télédétection et les études paléoenvironnementales en sont des exemples. Cette phase donne des indices sur les potentiels changements à venir, mais aussi sur les facteurs en jeu dans le processus étudié.

Il convient, ensuite, d'identifier clairement ces facteurs par le biais de l'étude de la littérature sur le sujet. La mise en lumière des dynamiques possibles et des facteurs d'influence dégage la structure des interactions des composantes du système qu'il est alors possible de modéliser.

L'étape de modélisation implique la paramétrisation du modèle en fonction du rôle de chaque facteur dans le système. La validation du modèle permet la création de scénarios tendanciels ou contrastés sur l'avenir du phénomène étudié.

L'étude de la littérature a permis d'éclairer la méthodologie utilisée pour ce travail et de révéler les facteurs en jeu dans le processus d'expansion des forêts. Ce travail s'inscrit dans une démarche méthodologique prospective en vue de la création d'une modélisation de la forêt de Pin à crochets de la vallée de Bassiès.

## II. Méthodologie utilisée pour créer une modélisation prospective de la forêt de Pins à crochets de la vallée de Bassiès

Un modèle est une représentation de la réalité ou la représentation d'une réalité. Il est, alors, à la fois soumis à la vision subjective du chercheur face au phénomène, et à la complexité des processus en jeu. Il est difficile de prendre en compte l'ensemble des paramètres jouant un rôle dans le phénomène analysé puisqu'il est régi par un système d'interactions complexe. La création d'un modèle nécessite, ainsi, une méthodologie claire pour mettre en évidence l'approche du chercheur et comprendre les paramètres pris en compte.

Les hypothèses de travail ont été créées au regard des modèles d'évolution des forêts développés dans la littérature et des caractéristiques écologiques du Pin à crochets.

Dans cette étude, la première hypothèse posée définit le scénario tendanciel mis au point dans ce projet. On postule, donc, sur le « laisser-faire » de la nature et la persistance de l'abandon de l'agro-pastoralisme dans la vallée.

Cette tendance est liée à la dispersion spatiale du Pin à crochets selon différents paramètres. Ce sont des facteurs qu'il convient d'identifier pour comprendre les dynamiques spatio-temporelles passées et anticiper les dynamiques futures. Les hypothèses suivantes sont posées au regard des modèles réalisés dans la littérature.

- L'âge de l'arbre influence sa production en graines viables
- La direction et la force du vent influencent l'organisation spatiale du peuplement au sein de la vallée
- La forêt se développe en « tâche d'huile », les jeunes arbres poussent à proximité de leurs parents
- L'occupation du sol joue un rôle dans la germination des graines, et ainsi l'organisation spatiale des arbres.

Ces hypothèses de travail sont mises en place à partir des modélisations développées dans la littérature, mais aussi en fonction des données disponibles sur le peuplement étudiés.

### A. Site d'étude et données

Pour modéliser une forêt, il convient de décrire précisément le milieu pour retirer les spécificités du peuplement à étudier. Les données disponibles permettent de mettre en évidence les facteurs qu'il est possible d'analyser.

#### 1. Site d'étude

Le cirque de Bassiès est une vallée en altitude à l'Ouest de la commune d'Auzat (figure 1, dans l'introduction). La vallée a gardé les stigmates d'un glacier qui a permis la formation de nombreux lacs et tourbières.

Le fond de vallée se situe à 1500m d'altitude et le plus haut pic du bassin versant (Pic rouge de Bassiès) culmine à 2676 m d'altitude.

Le cirque se situe à la frontière entre un climat océanique et méditerranéen, le climat est marqué par des étés chauds et des hivers froids avec de fortes précipitations, souvent neigeuses (Waddle, 2013).

Le site connaît un processus de recolonisation dû à la déprise agricole et l'abandon du pastoralisme dans les estives de la vallée. La végétation est composée de pelouses chlorophylliennes et de gispetières qui tendent à être colonisées par les landes à Callune ou à Rhododendron. Ces dernières sont des milieux favorables à l'implantation du Pin à crochets. Le pinus uncinata représente l'essence arborée principale de la vallée. Quelques feuillus se distinguent (bouleau) en fond de vallée.



*Figure 5 - Photographie de la vallée de Bassiès vue du refuge de Bassiès (9 juillet 2014, V. Roussel).*

La figure 5 permet de visualiser les principales caractéristiques de la vallée. Le versant Nord (à droite de la photographie) est composé de l'ancienne pinède et d'éboulis. Le Pic du Far (à gauche de la photographie) est principalement constitué de landes à callune, quelques Rhododendron y sont implantés et le sommet est composé d'une gispetière. Le fond de vallée est constitué de lacs, de tourbières et de bourrelets morainiques colonisés par le Pin à crochets.

## 2. Données :

- Données issues de la télédétection : l'information sur le passé

La modélisation de la future forêt nécessite la compréhension des dynamiques passées dans la zone d'étude, et la localisation précise des peuplements entre deux dates passées pour calibrer et valider le modèle. Pour cela, le peuplement de Pins à crochets dans la vallée de Bassiès a été cartographié par le biais de la télédétection (Waddle, 2013). La vectorisation des pins est réalisée à partir de photographies aériennes IRC (infrarouge couleur) pour quatre années : 1976, 1993, 2008 et 2013.

Pour 1976 et 2013, seulement les pins isolés ont été vectorisés. Tandis que pour 1993 et 2008, la forêt et les pins isolés ont été détectés. Le tableau 2 récapitule les données vectorisées.

Tableau 2 - Récapitulatif des données fournies par la télédétection

	DATES	Nombre d'arbres	Superficie de la forêt	Densité de la forêt (pin/m <sup>2</sup> )
POINTS (pins isolés)	1976	89	/	/
	1993	812	/	/
	2008	4275	/	/
	2013	350	/	/
POLYGONES (patches de forêt)	1993	Extrapolation : 2813	70 867m <sup>2</sup>	Extrapolation : 0.0397
	2008	7535	115 728.24m <sup>2</sup>	0.0651

En 2008, la vectorisation de la forêt a été effectuée par le biais de polygones. Néanmoins, un champ de nombre d'arbres par polygone a été ajouté. La quantité d'arbres par polygones est donc connue pour 2008, ce qui a permis de calculer la densité d'arbres au sein de la forêt. Pour 1993, la quantité d'arbres par polygones n'est pas connue, une extrapolation a été réalisée à partir des données de 2008.

Cet outil permet de définir deux variables intéressantes à étudier dans ce travail :

- L'âge des arbres. Il est possible d'attribuer une tranche d'âge aux pins. Par exemple, un pin vectorisé à partir de la photographie de 2008 a entre 20 et 5 ans
- La distance entre les pins. Cette variable permet de connaître la distance d'un nouveau pin avec l'arbre le plus proche l'année de vectorisation antérieure. Une distance minimale de dispersion des arbres par rapport à leurs potentiels parents peut, donc, être déterminée.

- Données topographiques

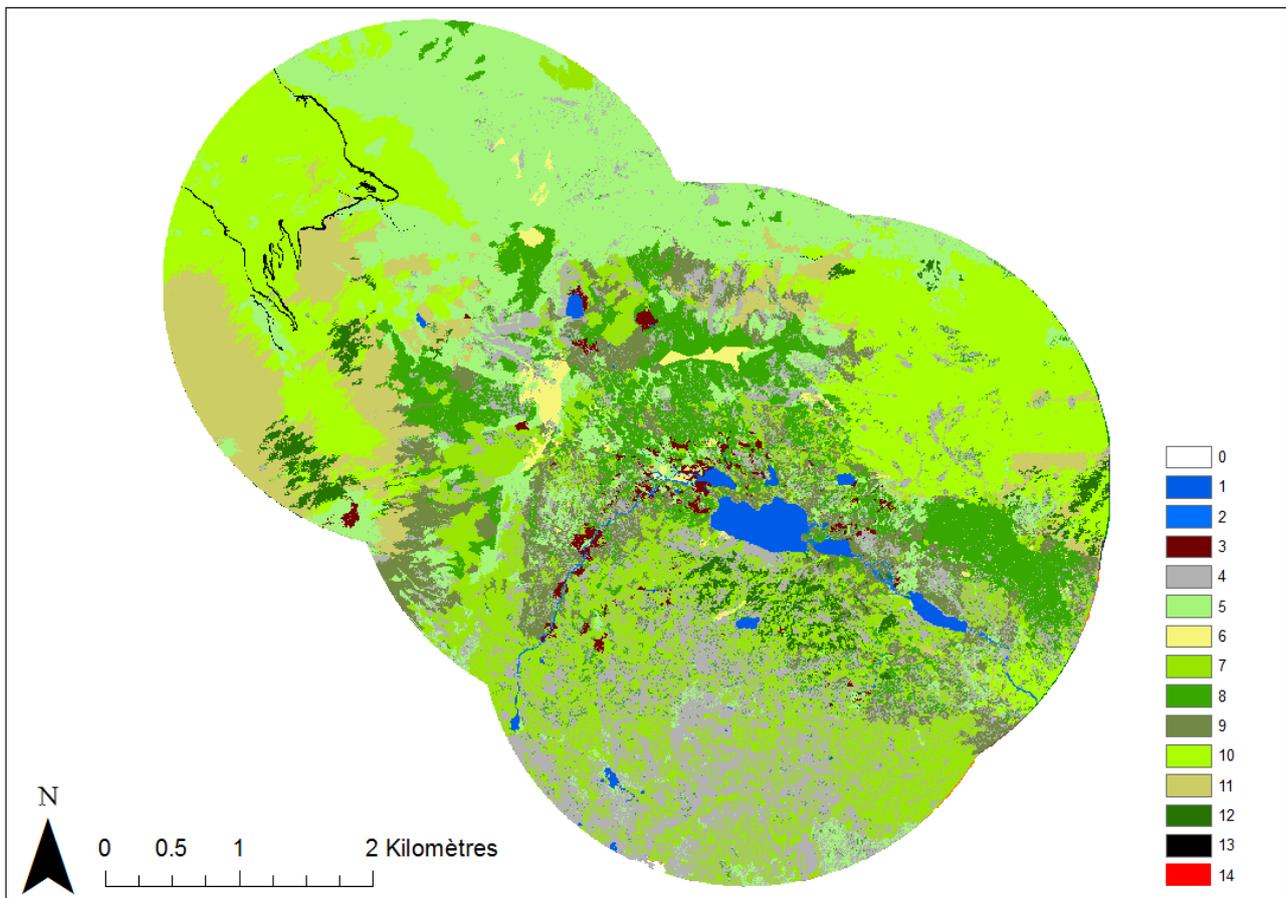
Au regard des modèles d'évolution de la forêt issus de la littérature, les caractéristiques topographiques sont essentielles pour comprendre les dynamiques spatio-temporelles de la forêt. Les cartes fournies par l'IGN ont permis d'avoir accès aux informations concernant la pente, l'altitude, l'orientation et la géologie (tableau 3).

Tableau 3 - Récapitulatif des couches de topographie

	Nature	Extension	Source	Résolution
Géologie	Raster	.tif	IGN	1.1
Orientation	Raster	.tif	IGN	25.25
Altitude	Raster	.tif	IGN	25.25
Pente	Raster	.tif	IGN	25.25

- Données de végétation

La première partie de ce travail nous a permis d'identifier la végétation comme étant un facteur important dans le processus de recolonisation de la forêt. Pour intégrer ce paramètre dans l'étude, une classification de l'occupation du sol a été obtenue. Elle identifie quatorze classes d'occupation du sol : Fond (0), Eau (1), Rivière (2), Tourbière (3), Surface minérale (4), Pelouse chlorophyllienne (5), Pelouse à Gispet (6), Lande à Rhododendron (7), Lande à Callune (8), Lande mixte (rhododendron, genévrier, callune et myrtille (9)), Feuillus (10), Forêt mixte (conifères et feuillus (11)), Conifère (12), Route (13) et Bâti (14). La figure 6 illustre la carte d'occupation du sol utilisée, la zone d'étude se trouvant au niveau des grands lacs à l'Est de la carte.



*Figure 6 - Cartographie de la classification de l'occupation du sol dans la vallée de Bassiès (OHM du Haut-Videssos)*

Les données disponibles permettent, donc, de visualiser les paramètres qui seront pris en compte pour l'analyse des données et la modélisation. Ils sont : la quantité d'arbres pour chaque année, l'âge des arbres, la distance au pin le plus proche, la géologie, l'orientation, l'altitude, la pente et l'occupation du sol.

## B. Méthodes d'analyse des dynamiques passées

Pour modéliser l'évolution future d'une forêt, il est important de mettre en évidence les dynamiques spatiales passées. Celles-ci donnent des indices sur les causes de l'évolution de la forêt et permettent d'envisager les dynamiques futures.

A partir des données disponibles grâce à la télédétection, la statistique géographique est un moyen efficace de mettre en évidence les évolutions de la forêt et l'importance des facteurs.

### 1. La statistique univariée

Cette méthode d'analyse des données consiste à étudier chaque paramètre un à un pour en retirer ses caractéristiques. Le tri à plat des variables permet, aussi, d'identifier les erreurs dans les données, de connaître les limites ou les biais liées à certaines variables. Cette étape est importante pour mieux comprendre les données et leur importance dans le phénomène étudié.

La statistique univariée peut consister à une simple moyenne arithmétique comme au calcul du coefficient d'asymétrie ou de la variance pour les variables quantitatives. Quant aux données qualitatives, il s'agit de dénombrer les modalités par le calcul d'occurrences ou de fréquences d'apparition<sup>3</sup>.

Dans cette étude, les variables à analyser sont qualitatives ou quantitatives comme l'indique le tableau 4.

Tableau 4 - Caractéristiques des variables à analyser

Variabes	Qualitative	Quantitative
Nombre d'arbres/an		X
Age des arbres	X	
Distance au pin le plus proche		X
Géologie	X	
Orientation	X	
Altitude		X
Pente		X
Occupation du sol	X	

### 2. La statistique multivariée

La statistique multivariée se distingue en deux type d'analyse, celles qui ont pour but d'expliquer une variable dépendante à partir de  $n$  variables indépendantes et celles qui intègrent simultanément toutes les variables<sup>2</sup>.

Dans le cadre de cette étude, le second type d'analyse est utilisé. Cette méthode repose sur l'analyse factorielle qui peut être l'analyse des composantes principales (ACP) ou celle des correspondances (AFC). L'ACP est appliquée à des variables quantitatives continues, tandis que l'AFC est utilisée pour des variables qualitatives. Les variables choisies pour comprendre

---

<sup>3</sup> Note de cours sur la Géographie, les enquêtes, les traitements statistiques et cartographiques, Laffly D., Professeur d'Université, UMR 5603 CNRS-Université de Toulouse II.

les dynamiques spatio-temporelles du Pin à crochets sont de nature qualitative pour certaines et quantitative pour d'autres. Une AFC est donc réalisée.

L'objectif de ce type d'analyse factorielle est de trouver une hiérarchisation de l'information contenue dans un tableau de données (Sanders, 1989). Grâce à l'utilisation de la distance du Chi2, l'AFC ne prend pas en compte les effectifs par la pondération des modalités. Ceci permet de donner davantage de poids à des variables de masses faibles et compenser les différences de poids des variables (Sanders, 1989).

Pour cette étude, l'intérêt de l'analyse factorielle est de mettre en évidence des profils de milieu où sont implantés les Pins à crochets et de comprendre les dynamiques passées afin d'en tirer un enseignement pour mieux appréhender le futur. L'analyse est faite à partir des pins détectés par télédétection pour les quatre années d'étude (1976, 1993, 2008 et 2013). Une base de données est extraite : pour chaque individu les données de position géographiques, d'âge, d'altitude, de pente, d'orientation, de géologie, de distance à l'arbre le plus proche et d'occupation du sol en 2008 sont associées. Pour cela, il a été nécessaire de transformer les polygones de forêt en points. Pour chaque polygone, on dénombre un arbre par mètre<sup>2</sup>. Ceci n'est pas représentatif de la réalité (tableau 3) mais est nécessaire pour la création de la base de données.

Les variables utilisées sont de différents types :

- quantitative : pente, altitude, distance au pin le plus proche
- qualitative : occupation du sol, âge des pins, géologie, orientation

Les variables quantitatives sont converties en variables qualitatives à l'aide de classes de valeurs.

Chaque individu et chaque variable sont projetés en fonction de leur proximité dans un graphique à trois axes factoriels. Généralement trois axes suffisent, ils représentent les droites les plus proches de l'ensemble des points.

Au cours d'une démarche exploratoire propre à ce type d'analyse, plusieurs AFC sont produites pour rechercher les structures au sein des individus qui se ressemblent. Les modalités ou variables aberrantes (qui pourraient être des erreurs de données) et extrêmes (données exceptionnelles) sont retirées ou agglomérées. Ces données déforment le nuage de points et cachent les structures typiques qu'il est important de mettre en évidence.

L'ensemble de la démarche est illustrée par la figure 7.

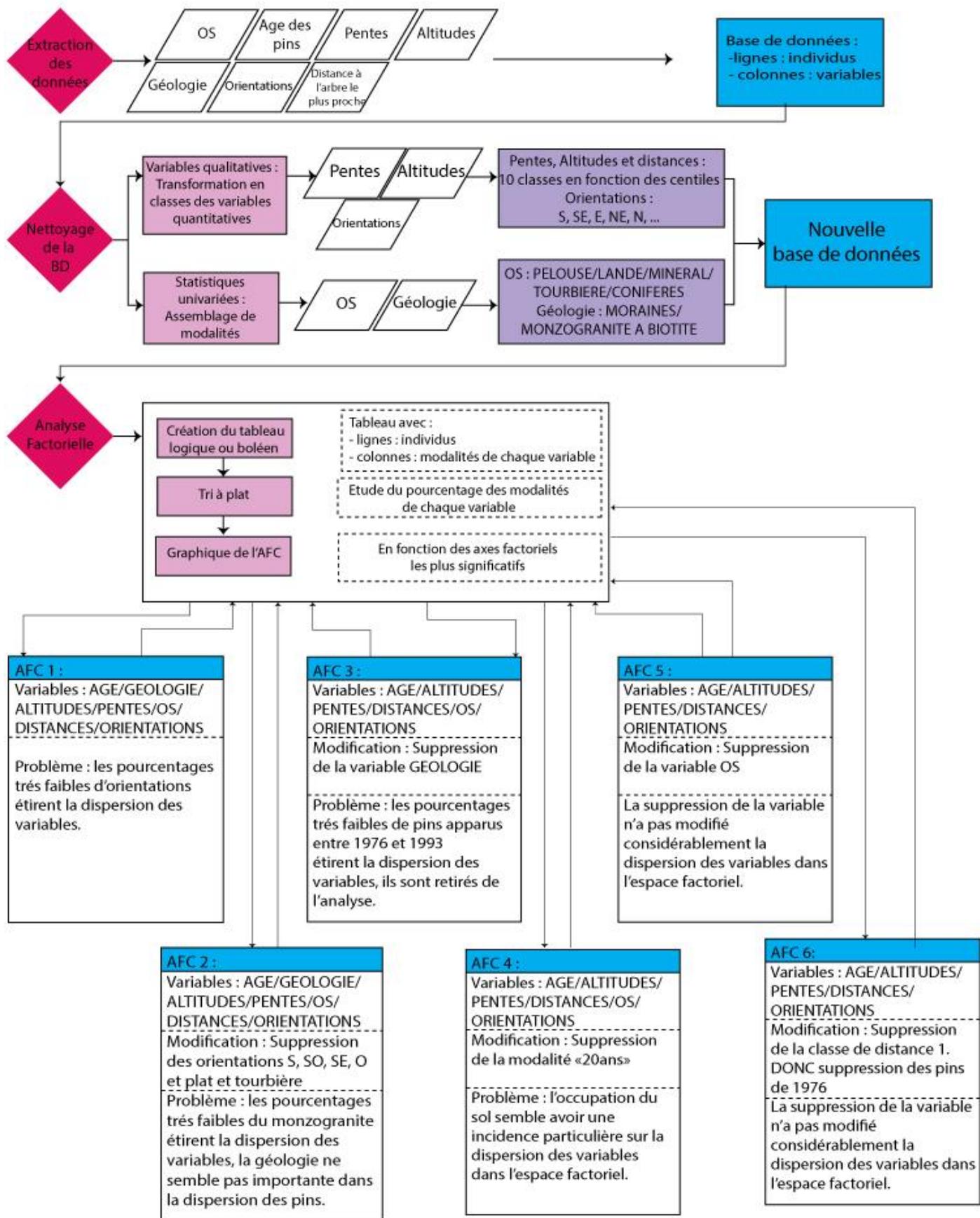


Figure 7- Schéma de la méthodologie utilisée pour la production de l'AFC

L'ensemble des AFC sont décrites dans les résultats puisque chacune apporte des informations sur les données.

L'AFC permet, donc, de déterminer graphiquement les proximités entre les modalités. Il est, ensuite, possible de regrouper les individus qui se ressemblent au sein d'une classe pour mettre en évidence les différents faciès. Pour cela, une classification ascendante hiérarchique (CAH) est réalisée. Dans cette étude, la CAH crée des classes de ressemblances en fonction de la distance entre les modalités (Chi2). Les classes mises en évidence par la CAH sont décrits dans les résultats.

## C. Adaptation du modèle TREELIM

TREELIM est un modèle développé par des chercheurs autrichiens (Wallentin et al, 2008) pour prédire les modes de régénération spontanée des forêts au niveau de la limite alpine des arbres entre 1954 et 2006. La modélisation est réalisée à partir d'une forêt d'épicéa dans les Alpes Centrales d'Autriche.

### 1. Un modèle individu-centré fondé sur des paramètres écologiques et géographiques

Comme défini dans la partie I, un modèle individu-centré tente de comprendre les phénomènes globaux par la simulation des comportements individuels. C'est ainsi que le modèle TREELIM fonctionne. Il simule les comportements des arbres (reproduction, mortalité etc.) pour acquérir une compréhension des processus spatio-temporels qui façonnent les milieux de limite altitudinale de la forêt.

Pour cela, différents scénarios sont comparés à la réalité pour valider la structure du modèle et sa sensibilité à la variation des paramètres.

Le modèle est développé sur Netlogo. Ce logiciel est adéquate pour réaliser un modèle individu-centré. En effet, il gère à la fois un environnement global à l'aide de *patch*, et des individus aux actions propres à l'aide de *turtles*. La synergie du logiciel avec des SIG permet de réaliser d'autres calculs et des cartographies plus précises.

Les données réelles sont produites à partir de méthodes géographiques. L'occupation du sol est déterminée par télédétection à partir d'une image en noir et blanc pour 1954, d'une image vraies couleurs pour 2003 et d'une image LiDAR pour 2006. Une classification supervisée est réalisée à partir des photographies. Les arbres sont, ensuite, détectés à la main pour 1954 afin de leur attribuer une hauteur aléatoire. Pour les photographies plus récentes, un modèle numérique de végétation est calculé à partir des données LiDAR pour marquer chaque arbre (excepté les individus dont la hauteur est inférieure à 4m).

Les connaissances sur l'écologie des arbres permettent de mettre en place les hypothèses sur l'évolution de la forêt en milieu de limite altitudinale. Quatre facteurs sont préjudiciables pour la germination de la graine : l'infertilité des graines, une végétation au sol dense, de grandes distances à l'arbre semencier et de fortes altitudes.

Quatre scénarios sont développés selon ces hypothèses :

- Le premier scénario est le scénario de base dans lequel les paramètres sont calibrés pour être les plus probables.
- Le second scénario est celui de la fécondité réduite, les arbres produisent moins de graines que dans le scénario de base.
- Le troisième scénario est celui de la compétition réduite des graines face à la couverture végétale. Ce scénario prend en compte l'évolution de l'occupation du sol, ce qui permet aux graines de mieux s'implanter dans les pâturages peu utilisés et dans les landes.
- Le dernier scénario est celui du vent faible. Le scénario met en évidence la distribution des arbres lorsque le vent est plus faible.

Le scénario de base est un scénario exploratoire tendanciel, alors que les autres sont davantage des scénarios exploratoires contrastés. L'altitude est un paramètre pris en compte de la même façon dans chaque scénario.

Les paramètres du modèle sont :

- La densité maximum de semis
- La distance à l'arbre semencier
- L'altitude
- La végétation au sol
- La hauteur des arbres
- L'âge des individus
- La densité de la forêt

L'ensemble de ces paramètres permet l'évolution de la forêt. Ils sont expliqués dans l'architecture du modèle.

## 2. Présentation du modèle TREELIM

Le modèle est fondé sur trois grands processus de la vie d'un arbre : la recolonisation spatiale (reproduction), la croissance et la mortalité. La figure 8 met en évidence l'imbrication de ces éléments au sein du modèle.

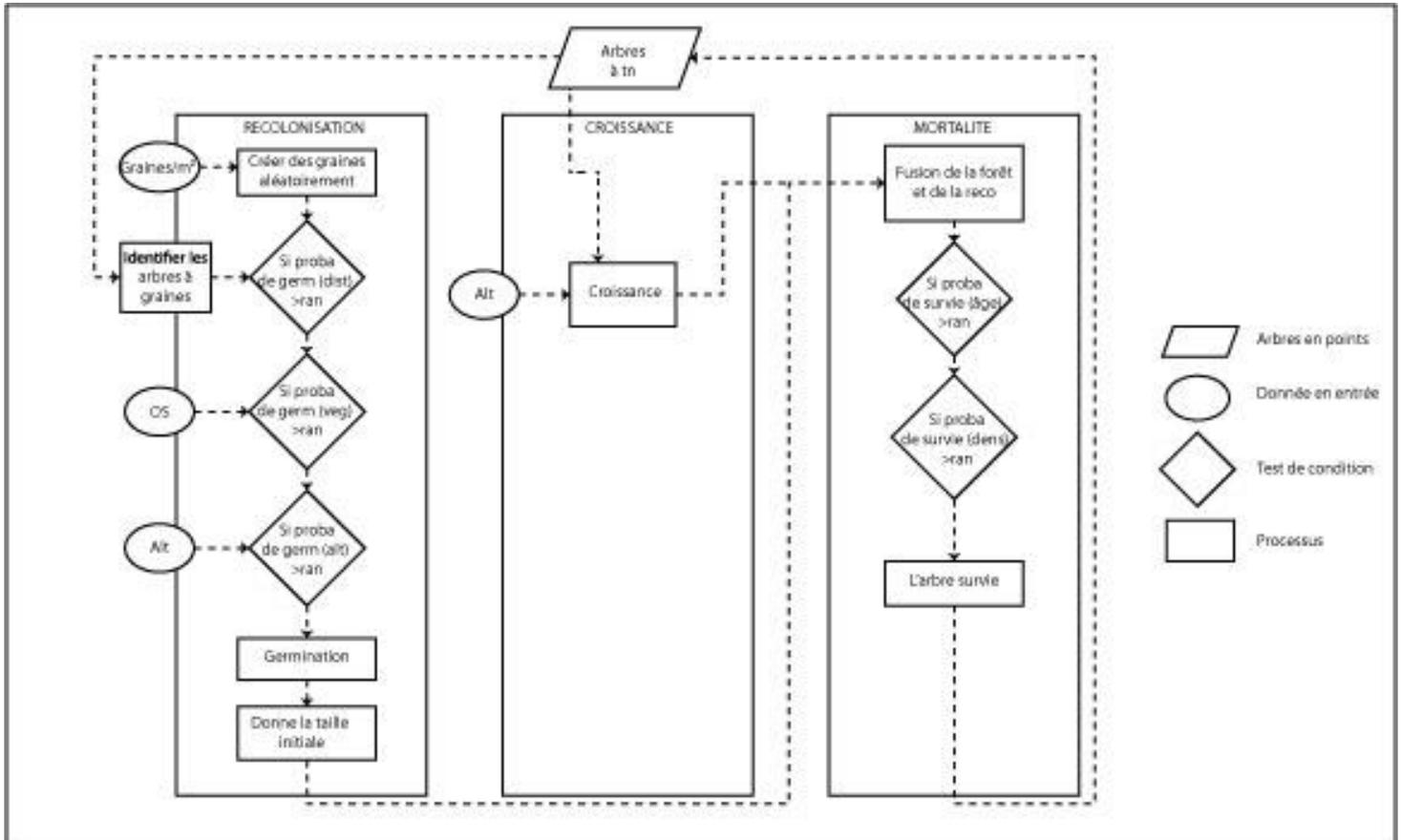


Figure 8 - Architecture du modèle TREELIM

Le premier pilier du modèle est la recolonisation spatiale permise par la reproduction, la dissémination et la germination des graines.

Le modèle crée un certain nombre de graines (variant selon les scénarios) qui sont distribuées aléatoirement dans le site d'étude. Ces graines sont soumises à une première condition, la **proximité à l'arbre semencier**. A partir de 7m de hauteur un arbre peut produire des graines. Si une graine se situe au-delà d'une certaine distance (variant selon les scénarios) de l'arbre semencier le plus proche, elle meurt.

Les graines qui survivent au premier test sont soumises à la seconde condition : trouver une **occupation du sol** sur laquelle elle puisse germer. Des probabilités de germination sont calculées pour chaque occupation du sol. Si la graine ne peut s'implanter sur ce type de végétation alors elle meurt.

Les graines qui survivent au second test sont soumises à la troisième condition : ne pas dépasser une certaine **altitude**. Les épicéas sont des conifères qui ne supportent pas de fortes altitudes en raison du climat. Au-delà de 1550m d'altitude la graine ne peut s'implanter, elle meurt. Cette règle est valable pour l'ensemble des scénarios.

Les graines qui passent le dernier test peuvent alors germer et former un nouvel arbre.

Le second pilier du modèle est la croissance. En effet, dans le modèle TREELIM, l'âge des arbres est basé sur leur hauteur. Il est donc important d'incrémenter la taille des arbres en fonction des itérations pour que les jeunes arbres deviennent matures et les vieux arbres meurent. Ce paramètre est valable pour l'ensemble des scénarios. Il est défini par une courbe sigmoïdale dépendante de la hauteur, de l'altitude des arbres et de paramètres stochastiques.

Le troisième pilier du modèle définit la mortalité des arbres qui est valable pour l'ensemble des scénarios. Deux facteurs peuvent causer la mortalité des arbres. D'abord, les jeunes arbres (moins de 6ans) peuvent subir une *mortalité infantile*, leur probabilité de survie augmente, donc, avec l'augmentation de l'âge. Ensuite, les arbres de plus de 7 ans sont soumis à un risque de mortalité en fonction de la densité de la forêt. En effet, les épicéas sont des arbres qui supportent mal l'ombre, la compétition avec les autres arbres est, donc, rude. Leur probabilité de survie dépend de leur âge, les plus vieux arbres n'y sont pas soumis, et de la densité de la canopée. Les arbres qui survivent aux conditions de mortalité sont, alors, ajoutés aux arbres de l'année précédente.

Les paramètres variant en fonction des scénarios sont, donc, la densité de graines disséminées, la distance de dissémination et la germination en fonction de l'occupation du sol. Pour le scénario de base, qui utilise les paramètres les plus probables, la densité de graines disséminées est 11 graines/m<sup>2</sup>. La distance à l'arbre semencier le plus proche doit être entre 15m et 110m. Et les probabilités de germination en fonction de la végétation au sol sont les suivantes :

- Forêt : 100%
- Landes : 34%
- Pâturages peu utilisés : 32%
- Pâturages fréquemment utilisés : 2%
- Sol nu/bâti : 1%

Pour le scénario de la fécondité réduite, le paramètre variant est la densité de graines disséminées. Pour modéliser la baisse possible de fécondité des arbres, le modèle disperse, seulement 6 graines/m<sup>2</sup>.

Pour le scénario de vent faible, le paramètre variant est la distance maximale de dispersion des graines. De 110m, elle passe à 20m.

Pour le scénario de compétition réduite, le paramètre variant est la probabilité de germination en fonction de l'occupation du sol. Les probabilités des occupations du sol *Pâturages peu utilisées* et *Landes* sont augmentées de 30%.

### 3. Apports du modèle réalisé dans ce mémoire

Le modèle TREELIM vise à comprendre les modes de recolonisation d'une forêt au niveau de sa limite altitudinale pour mettre en évidence la remontée de la limite supérieure des arbres dans un milieu soumis à la déprise agricole mais où le pastoralisme subsiste. Ce modèle fonctionne dans les Alpes et pour une forêt d'épicéa. La modélisation réalisée dans ce mémoire adapte TREELIM pour des raisons techniques et conceptuelles.

D'abord, à l'instar des modèles « boîtes noires » (les réseaux neuronaux par exemple), l'approche individu-centrée permet de créer un modèle explicite où tous les paramètres sont choisis et calibrés par le chercheur. Néanmoins, elle demande des connaissances en programmation et en écologie. L'adaptation du modèle TREELIM donne, donc, une base à la programmation et une approche écologique de l'évolution des paysages.

Ensuite, le modèle présenté ci-dessus concerne une forêt de conifères en altitude. Les structures qui régissent le milieu sont, alors, similaires à celles de la vallée d'étude de ce mémoire.

Cependant, la modélisation réalisée dans ce travail permet de comprendre d'autres patterns. Le site d'étude se situe dans les Pyrénées ariégeoises et l'essence étudiée est le Pin à crochets. Le modèle créé apporte une compréhension des dynamiques du Pin à crochets dans une vallée qui est soumise à l'abandon du pastoralisme depuis plusieurs décennies, où l'activité anthropique y est presque nulle (seule la randonnée est pratiquée). Le site d'étude est une zone bien plus humide que le site de TREELIM.

L'apport du présent modèle est, donc, fondé sur les particularités du site et de l'essence étudiés.

## D. Modélisation du peuplement de Pins à crochets dans la vallée de Bassiès

Dans cette partie la conception et l'architecture du modèle réalisé sont clarifiées pour ensuite comprendre comment les facteurs identifiés sont validés et le scénario mis en place.

### 1. Présentation du modèle

La modélisation réalisée dans ce travail a pour but d'appréhender les modes d'évolution d'une forêt de Pins à crochets dans la vallée de Bassiès, pour dégager une projection de la future forêt. Adaptation du modèle TREELIM, elle intègre des données écologiques et géographiques. Elle tente de comprendre les dynamiques spatio-temporelles du peuplement entre 1993 et 2008 pour simuler la future forêt pour 2050. La modélisation est, donc, prospective, individu-centrée et exploratoire.

Les paramètres pris en compte sont déduits de la littérature, puis choisis en fonction des données disponibles. Ils sont les suivants :

- L'âge des arbres
- Le nombre de graines produites par pin
- La force moyenne du vent durant la période de dissémination des graines/distance à l'arbre semencier
- La proportion moyenne des directions de vent durant la période de dissémination
- La mortalité des graines en fonction du processus de germination (type d'occupation et altitude) et selon d'autres nombreux facteurs pouvant entraîner la mort des jeunes arbres (aléas, maladie, insectes, bétail etc.)

La figure 9 présente l'imbrication des paramètres au sein de l'architecture du modèle.

La modélisation est basée sur trois processus de la recolonisation spatiale : la production, la dispersion et la germination des graines.

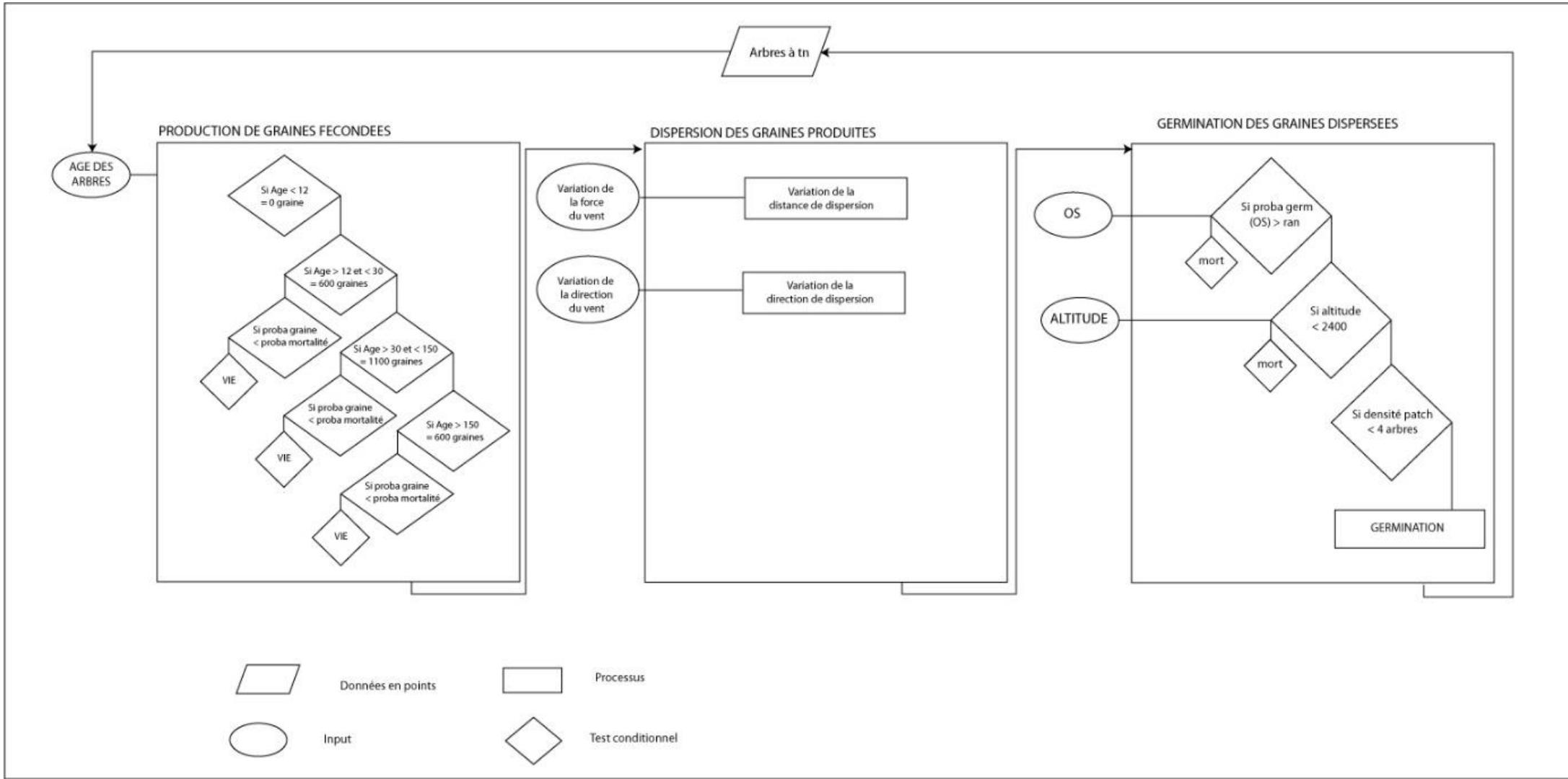


Figure 9 - Architecture du modèle

Le processus de production des graines est régi par l'âge des arbres. La littérature a permis de mettre en évidence l'âge de maturité des arbres et la proportion de graines fécondées par les arbres (figure 10).

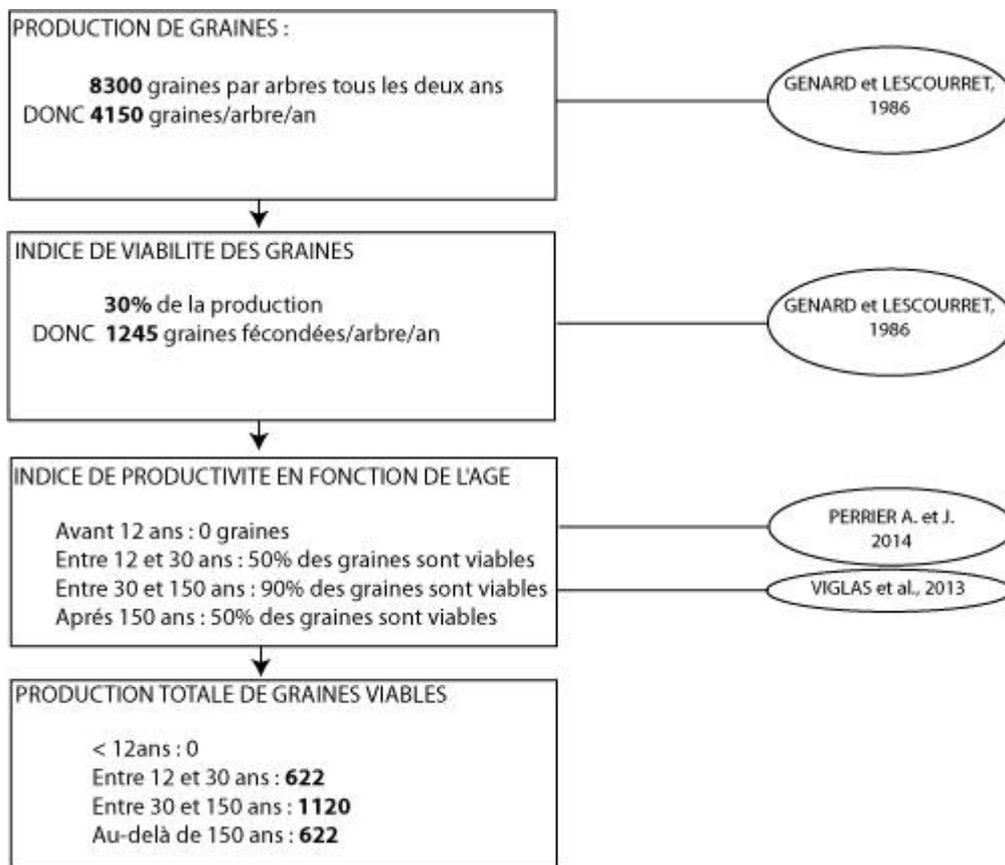


Figure 10 - Calcul du nombre de graines produites par arbre selon la littérature

Les quantités de graines viables produites par un arbre selon la littérature ne permettent pas de s'approcher de la réalité, ces valeurs sont bien trop élevées. Ce paramètre est, alors, recalculé en fonction des données empiriques. Un coefficient de mortalité (*proba mortalité* dans l'architecture du modèle) est mis en place pour tuer de manière aléatoire une partie des graines. Ce coefficient permet au modèle de simuler approximativement le même nombre d'arbres entre 1993 et 2008 par rapport à la réalité, c'est-à-dire 11 810 arbres. Le coefficient est un moyen de prendre en compte la mortalité des graines et de jeunes arbres liée aux intempéries ou autres aléas périlleux en hautes montagnes.

La dispersion des graines est calculée à partir de deux paramètres empiriques. Le premier est la **force du vent** lors de la période de dissémination des graines. Les graines du Pin à crochets sont munies d'une petite aile, ainsi, la dissémination est principalement déterminée par le vent. Les petits rongeurs ou autres disséminateurs ne sont pas pris en compte dans ce modèle. La force du vent est calculée en fonction de l'écart-type des distances au potentiel parent. C'est-à-dire que pour chaque nouvel arbre à une année d'étude, la distance à l'arbre le plus proche l'année d'étude précédente est calculée. A partir de ce calcul, l'écart-type de toutes les distances sont déterminées pour connaître la dispersion des valeurs autour de la moyenne. L'écart-type est utilisé pour prendre en compte des situations de force

de vent non communes mais probables. L'écart-type calculé à partir des données empiriques est 130m, les graines sont, donc, disséminées de 0 à 130m de l'arbre semencier. Le second paramètre de dispersion des graines est la **direction du vent**. Le site d'étude étant une vallée, il est soumis à des variations des directions du vent, entre l'effet de foehn qui provoque des vents du Sud et les brises qui entraînent des variations journalières de vent d'Ouest et de vent d'Est. Les graines du Pin à crochets étant très soumises au vent par leur aile, il est important de prendre en compte ce paramètre. Une station météorologique a été installée près du refuge de Bassiès, ainsi, des données de vent ont été enregistrées pour l'année 2012. Elles ont été récupérées pour calculer les probabilités de chaque direction de vent lors de période de dissémination. Les probabilités sont réalisées à partir des pourcentages d'apparition de chaque direction de vent calculés 31 fois par jour de juin 2012 à septembre 2012, ils sont illustrés par la figure 11.

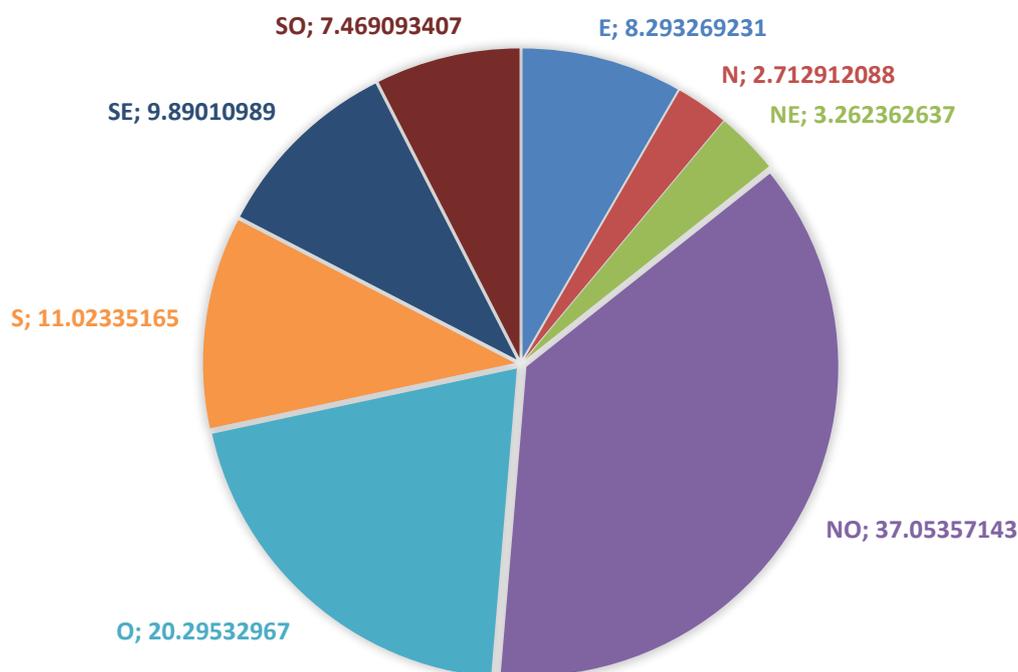


Figure 11 - Pourcentages de directions de vent entre juin et septembre 2012 dans la vallée de Bassiès

Le vent souffle, donc, davantage du Nord-Ouest et Sud-Est, de l'Ouest et du Sud dans la vallée de Bassiès entre juin et septembre. Les graines sont davantage susceptibles de partir vers le Sud-Est, Nord-Ouest, l'Est et le Nord de l'arbre semencier.

La dernière phase du modèle consiste en la germination des graines dispersées. Après avoir retiré les graines non fécondées, les deux paramètres à prendre en compte pour la germination des graines sont l'altitude et le type d'occupation du sol sur lequel la graine est tombée.

L'**altitude** à partir de laquelle les facteurs limitants (froid ou sécheresse) empêchent la germination de la graine est déterminée en fonction de la littérature. Selon Riou-Nivert (2005) la limite altitudinale du Pin à crochets en soulane est 2400m et en ombrée 2200m d'altitude. Le site d'étude étant un cirque, les orientations sont multiples, ainsi, l'altitude maximale

déterminée par Riou-Nivert est choisie. Les arbres ne pourront pas aller au-delà de 2400m d'altitude dans des conditions climatiques actuelles.

L'influence de l'**occupation du sol** dans la germination de la graine est déterminée à partir de calculs empiriques, puis vérifiée selon la littérature. Les données de télédétection ont permis de connaître le pourcentage d'apparition de nouveaux pins sur chaque occupation du sol entre 2008 et 2013. Les pourcentages sont réalisés seulement à partir des pins isolés (figure 12).

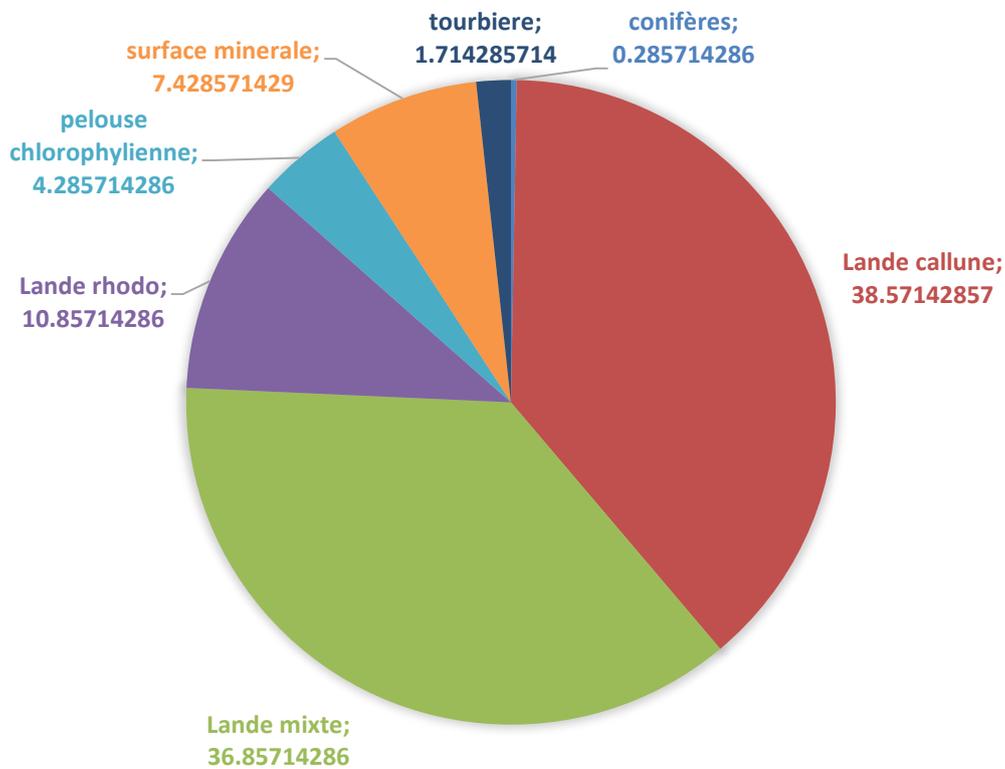


Figure 12 - Pourcentages de pins isolés apparus sur chaque occupation du sol entre 2008 et 2013

Ces pourcentages représentent, donc, les probabilités de germination des graines en fonction de chaque occupation du sol (*proba germ (OS)* dans l'architecture du modèle). Dans la littérature, les landes sont considérées de façon consensuelle comme le milieu le plus propice à l'implantation d'une graine. Ce type de milieu est à la fois assez dense pour protéger la graine des rongeurs et du soleil et peu dense pour permettre la pénétration de la graine vers le sol.

Le Pin à crochets tolérant peu l'ombre, un paramètre de densité de la forêt a été ajouté, pas plus de quatre arbres ne peuvent s'implanter dans un espace de 25m<sup>2</sup>.

Il est important d'ajouter que dans ce modèle l'aspect dynamique de l'occupation du sol n'est pas pris en compte, la carte de 2008 sera valable pour 2050.

La modélisation est réalisée à partir de différents paramètres issus de données empiriques et de la littérature sur le Pin à crochets et la modélisation. Ils représentent les paramètres les plus probables pour simuler l'évolution de la forêt. Ils sont, ensuite, calibrés pour réaliser des simulations au plus près de la réalité.

La figure 13 schématise le fonctionnement conceptuel du modèle.

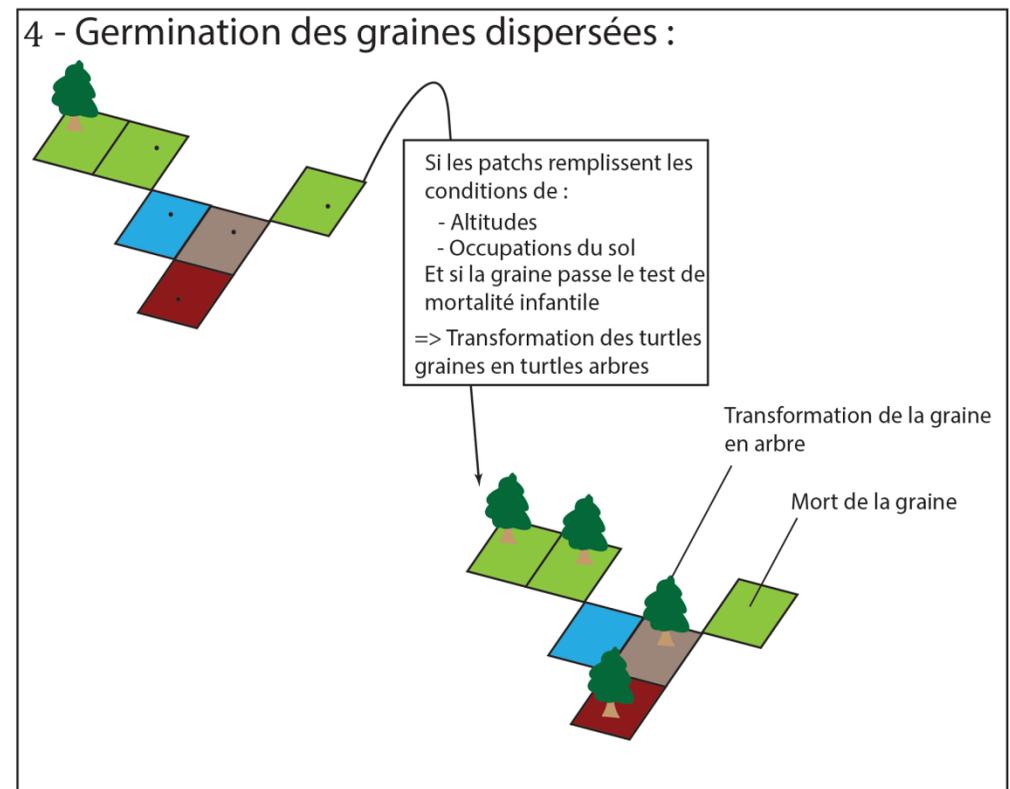
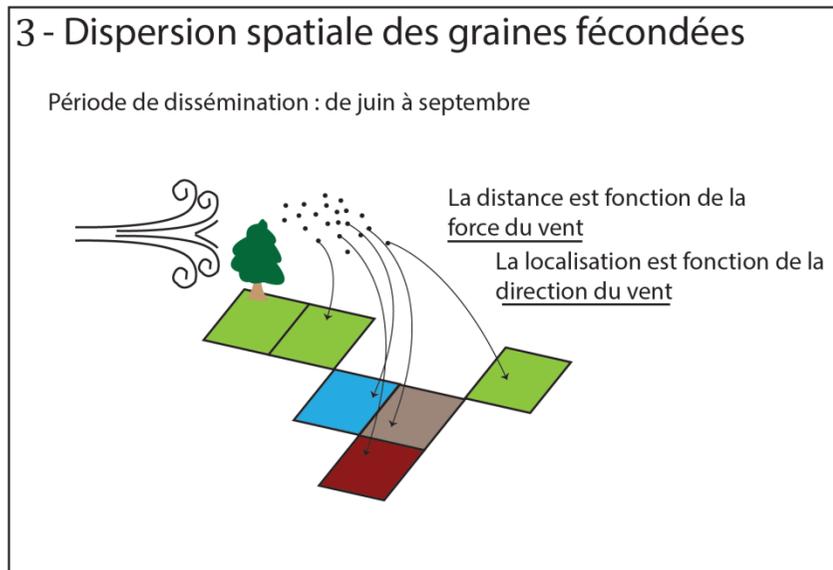
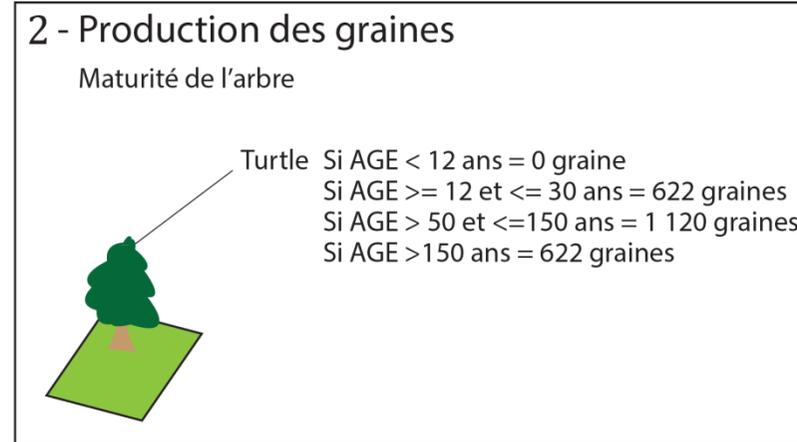
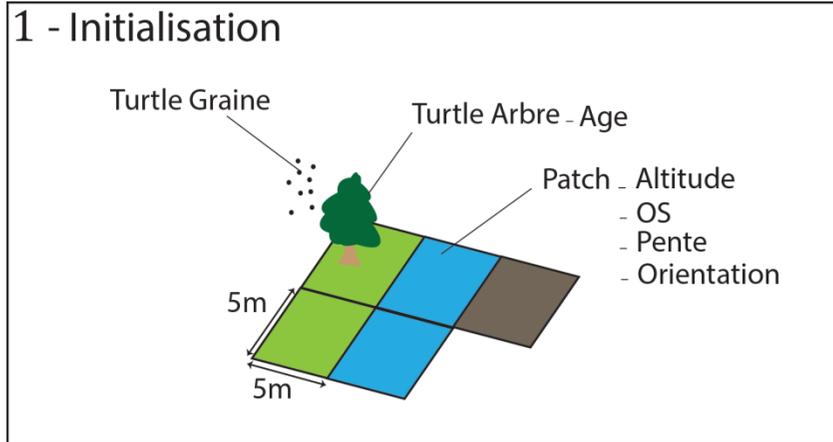


Figure 13 - Schéma du fonctionnement conceptuel du modèle

## 2. La robustesse du modèle

Pour tester la robustesse du modèle des simulations sont réalisées entre 1993 et 2008. Le choix des dates est fait en fonction de la viabilité des données de télédétection. En effet, pour ces deux dates les données de forêt et de pins isolés sont complètes. Pour vérifier la robustesse du modèle, les paramètres utilisés pour la simulation sont calibrés pour être les plus probables. Ce sont, donc, les valeurs présentées dans la partie précédentes.

Le tableau 5 synthétise les paramètres utilisés pour tester la robustesse du modèle.

*Tableau 5 - Récapitulatif des paramètres utilisés pour vérifier la robustesse du modèle*

Paramètres	Valeurs des paramètres
Production de graines en fonction de l'âge	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avant 12 ans : 0 graines</li> <li>- Entre 12 et 30 ans : 622 graines</li> <li>- Entre 30 et 150 ans : 1100 graines</li> <li>- Au-delà de 150 ans : 622 graines</li> </ul>
Coefficient de mortalité des graines	288
Distance de dispersion en fonction de la force du vent	De 0 à 130m
Probabilités de direction de dispersion des graines en fonction de la direction du vent	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ouest : 0.083</li> <li>- Sud : 0.027</li> <li>- Sud-Ouest : 0.033</li> <li>- Sud-Est : 0.371</li> <li>- Est : 0.203</li> <li>- Nord : 0.110</li> <li>- Nord-Ouest : 0.099</li> <li>- Nord-Est : 0.075</li> </ul>
Probabilités de germination des graines en fonction de l'occupation du sol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fond = 0</li> <li>- Eau = 0</li> <li>- Rivière = 0</li> <li>- Tourbière = 0.017142</li> <li>- Surface minérale = 0.0742885</li> <li>- Pelouse chlorophyllienne = 0.042857</li> <li>- Pelouse à Gispet = 0</li> <li>- Lande à Rhododendron = 0.108571</li> <li>- Lande à Callune = 0.385714</li> <li>- Lande mixte = 0.368571</li> <li>- Feuillus = 0</li> <li>- Forêt mixte = 0</li> <li>- Conifères = 0.002857</li> <li>- Routes = 0</li> <li>- Bâti = 0</li> </ul>
Seuil altitudinal de germination des graines	2400m
Densité d'arbres à partir de laquelle aucun pin ne peut s'implanter	4 arbres pour 25m <sup>2</sup>

Une fois les paramètres fixés, 25 simulations sont lancées entre 1993 et 2008. En effet, certains paramètres sont des variables aléatoires, il est, alors, nécessaire de faire une moyenne de plusieurs simulations pour éviter de se baser seulement sur un cas exceptionnel.

La carte finale, appelée *Simulation 1* et réalisée à partir des moyennes de pins, est comparée avec la carte réelle de 2008 pour connaître la robustesse du modèle.

### 3. Sensibilité des paramètres

Après avoir vérifié la robustesse du modèle pour l'ensemble des composantes, des tests de sensibilités des paramètres sont réalisés entre 1993 et 2008. Ils consistent en la variation des valeurs paramétriques choisies pour comprendre l'importance de chaque paramètre dans la dispersion des individus.

- Production de graine en fonction de l'âge : Simulation 2

Le premier test de sensibilité consiste à vérifier la nécessité de créer des tranches d'âge pour lesquelles les arbres produisent plus ou moins de graines fécondées.

Pour cela, il n'existe plus de tranches d'âge, tous les arbres produisent 622 graines qui subissent le coefficient de mortalité à 288. Une carte de la répartition des pins est réalisée à partir de 25 simulations comprenant la variation du paramètre production de graines en fonction de l'âge. Cette carte, appelée *Simulation 2*, est comparée avec la réalité pour comprendre l'importance du facteur *Age* dans la dispersion du pin.

- Germination des graines en fonction de l'occupation du sol : Simulation 3

Le second test de sensibilité se base sur la variation du paramètre *Occupation du sol*. Il permet de voir la dispersion des individus si la végétation au sol ne représente pas un facteur limitant pour le développement de la graine.

Pour mettre en place cette carte, toutes les probabilités de germination sont mises à 1, chaque occupation du sol peut donc accueillir une graine. Pour les surfaces en eau la probabilité est laissée à 0.

Une carte appelée *Simulation 3* est réalisée à partir de 25 simulations comprenant la variation du paramètre *germination en fonction de l'occupation du sol*. Cette carte est comparée avec la réalité de 2008 pour comprendre l'influence de la végétation au sol dans le processus de recolonisation du Pin à crochets.

- Dispersion des graines en fonction de la direction du vent : Simulation 4

Pour prendre en compte la variation des directions du vent au sein de la vallée, des probabilités de direction de dispersion des graines ont été calculées à partir de données empiriques. Le troisième test de sensibilité consiste, alors, à retirer les directions préférentielles des vents lors de la période de dissémination pour visualiser la distribution des nouveaux arbres. Ainsi, toutes les probabilités de direction sont mises à 1 pour que les graines produites partent dans une direction choisie aléatoirement.

Une carte appelée *Simulation 4* est créée à partir de 25 simulations faites sans les probabilités de direction de vent. Cette carte est comparée avec la réalité pour observer l'importance de la direction du vent dans la dispersion des graines.

- Force du vent et proximité au parent : Simulation 5a et 5b

Le dernier test de sensibilité tente de mettre en évidence la répartition spatiale du pin en fonction de la distance à l'arbre semencier. Ce paramètre peut varier en fonction de la force du vent. Dans la simulation 1, la force du vent permet à la graine de s'implanter aléatoirement entre 0 et 130m de son parent. Deux tests sont réalisés, le premier réduit la distance maximale de dispersion (de 0 à 40m de l'arbre semencier) et le second l'augmente (de 0 à 200m). Les deux cartes appelées *Simulation 5a* et *Simulation 5b* sont réalisées à partir de 25 simulations produites avec ces valeurs. Les cartes sont comparées avec la réalité de 2008 pour comprendre la distribution spatiale des arbres en fonction de la force du vent.

#### 4. Le scénario tendanciel

Les tests de robustesse du modèle et de sensibilité des paramètres permettent de calibrer le modèle et de mieux comprendre les dynamiques en jeu. Ils sont essentiels pour mettre en place les scénarios, dernière étape de la modélisation. Dans ce projet, un scénario est envisagé et présente l'évolution tendancielle de la forêt. Il est impossible de prévoir le futur, on peut seulement envisager des avenir possibles voire plausibles du système étudié. Il est donc nécessaire de construire différents scénarios explorant les conséquences de différents phénomènes. Dans le cadre de ce travail, un scénario sur les conséquences de la réintroduction de l'agro-pastoralisme dans la vallée a été envisagé. Cependant, le manque de données d'occupation du sol pour des dates variées empêche l'évaluation des futurs possibles liés à cette condition. Un autre scénario sur les conséquences des changements climatiques sur l'évolution de la forêt a été considéré. Le scénario serait basé sur les prédictions du GIEC, or l'impact de l'augmentation des températures, de la hausse des gelées automnales et printanières sur la production, la dispersion et la germination des graines est difficile à quantifier. Ces scénarios seront seulement envisagés en perspective du travail par manque de temps.

Le scénario réalisé est une simulation de l'évolution de la forêt tendancielle. Le scénario tente de mettre en évidence les dynamiques spatio-temporelles du Pin à crochets pour l'année 2050 en fonction des paramètres les plus probables. Il modélise l'évolution de la forêt dans le cas où les conditions climatiques et les activités anthropiques restent inchangées (pratiquement nulles).

Pour modéliser la forêt dans ces conditions, les valeurs des paramètres restent les mêmes que pour la Simulation 1. La différence est l'horizon temporel, le modèle est lancé pour 2050.

Une carte appelée Scénario est produite à partir de 25 simulations réalisées avec les paramètres les plus probables.

#### 5. Indicateur de validité des simulations

Pour analyser les cartes développées par le modèle, il est essentiel de pouvoir comparer la quantité et la spatialité des individus au sein du site d'étude. Une grille avec des mailles de 1000m<sup>2</sup> est positionnée de la même façon sur chaque carte. La quantité de points par maille peut, donc, être visible par le biais de plages de couleurs. Cette grille de densité de points permet la comparaison à la fois quantitative et spatiale de la distribution des pins. La

comparaison entre les simulations et la réalité se fait donc à partir de deux analyses. La première consiste à calculer la superficie des surfaces colonisées par le pin en fonction de deux indices de densité, (1) de recolonisation à forêt claire et (2) de forêt claire à forêt dense. La seconde manière de comparer la simulation à la réalité consiste à analyser les allocations spatiales par pixel de 1000m<sup>2</sup>. Cinq classes sont dégagées : (1) densité bien détectée, (2) densité non détectée, (3) densité sur-estimée par le modèle, (4) densité sous-estimée par le modèle, (5) le modèle a simulé des arbres alors qu'il n'y en a pas en réalité.

Certains paramètres du modèle sont soumis à des variables aléatoires. Ceci permet de préserver une part de l'incertitude des phénomènes naturels. Néanmoins, par cette méthode, la dispersion des individus dans une simulation peut être le résultat d'un cas exceptionnel. Pour contourner ce biais potentiel, pour chaque simulation et scénario 25 runs sont lancés. Ils sont compilés dans un tableur pour calculer la moyenne d'arbres par maille de 1000m<sup>2</sup>.

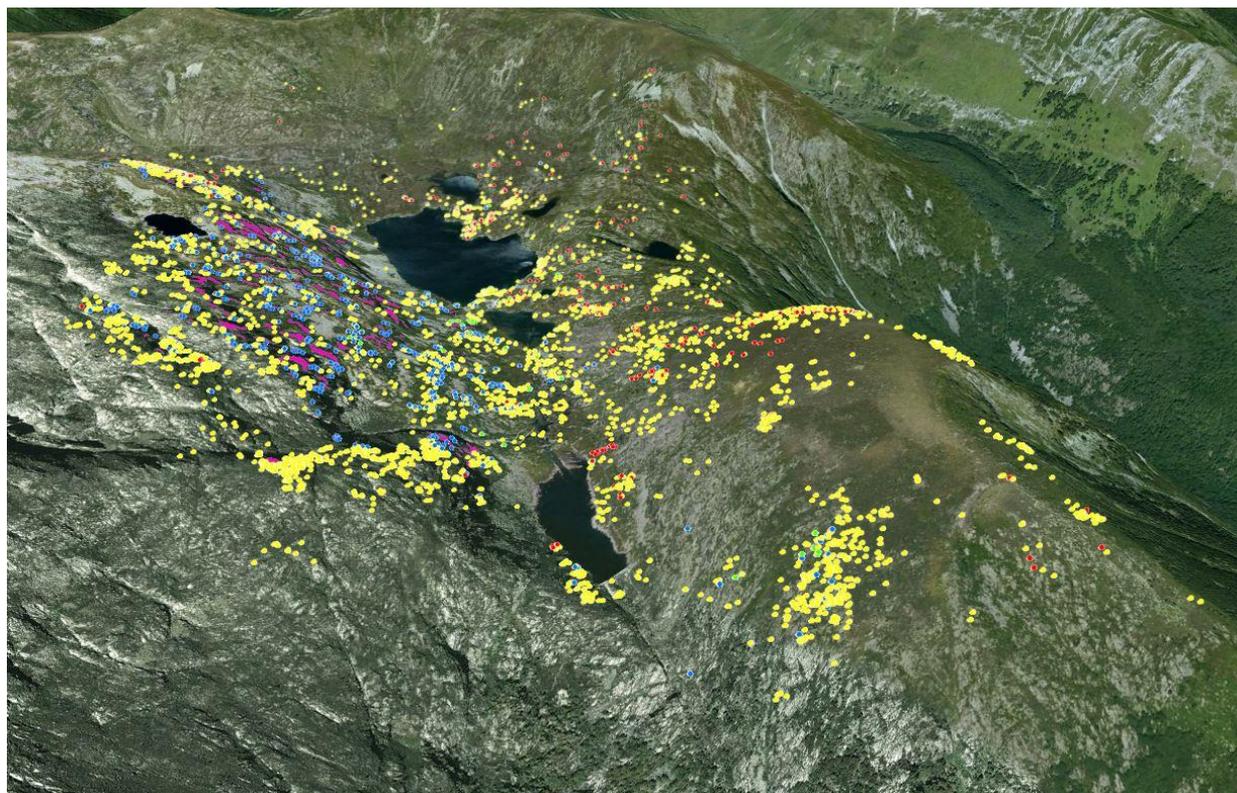
### III. Résultats

#### A. Analyse des dynamiques passées : les statistiques

##### 1. Les statistiques simples :

- Cartographie de l'évolution du peuplement entre 1976 et 2013

Une ancienne pinède est installée depuis plus de 200 ans sur le versant Nord de la vallée. En 1976, une vingtaine de pins sont enregistrés dans le fond de vallée. Puis, l'expansion se poursuit entre 1976 et 1993 en tâche d'huile autour de la pinède et par la dispersion des pins isolés vers le fond de vallée. Entre 1993 et 2008, une explosion du nombre de pins isolés est enregistrée. Ceux-ci remontent vers l'étang de Sigriou, au-dessus de l'ancienne pinède, mais vont surtout coloniser le fond de vallée et le versant Sud, notamment sur le Pic du Far. Entre 2008 et 2013, quelques nouveaux pins sont aperçus vers le fond du cirque. Les dynamiques reportées sont illustrées par la figure 14.



- |                                 |                                 |
|---------------------------------|---------------------------------|
| ● Pin présent en 1976           | ● Pin apparu entre 1993 et 2008 |
| ● Pin apparu entre 1976 et 1993 | ● Pin apparu entre 2008 et 2013 |

Figure 14 - Cartographie de l'évolution de la forêt de Pins à crochets dans la vallée de Bassiès. Fond de carte : Google Earth.

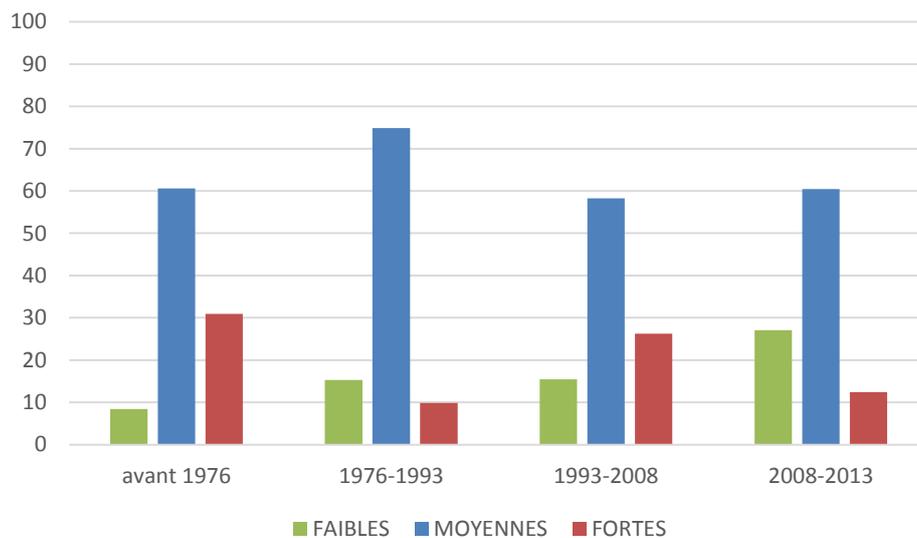
- La pente

La vallée de Bassiès est en forme de U, les versants sont, donc, marqués par de fortes pentes, tandis que le fond de vallée est plat.

Pour analyser le facteur pente, trois classes de pentes ont été créées :

- Les pentes faibles : de 0% à 20%
- Les pentes moyennes : de 20% à 40%
- Les fortes pentes : de 40% à 60%

Une analyse bivariée permet de comparer le type de pentes sur lequel se sont implantés les pins apparus à chaque année d'étude (figure 15).



*Figure 15 - Types de pente colonisés par les pins en fonction de leur date d'apparition.*

Globalement les individus colonisent majoritairement des pentes entre 20 et 40%. Néanmoins, les pins apparus avant 1976 et ceux apparus entre 1993 et 2008 ont davantage colonisés des pentes abruptes. L'ancienne pinède est installée sur le versant Nord de la vallée, ce qui explique les fortes pentes enregistrées avant 1976. Entre 1993 et 2008, on observe une remontée des pins isolés sur le versant Sud (figure 14), ce qui explique les fortes pentes observées.

Les pins isolés colonisent davantage les zones de faibles pentes, alors que la forêt se situe sur des pentes abruptes, comme l'illustre la figure 16. La descente vers le fond de vallée explique l'importance des pins isolés sur des zones de faibles pentes.

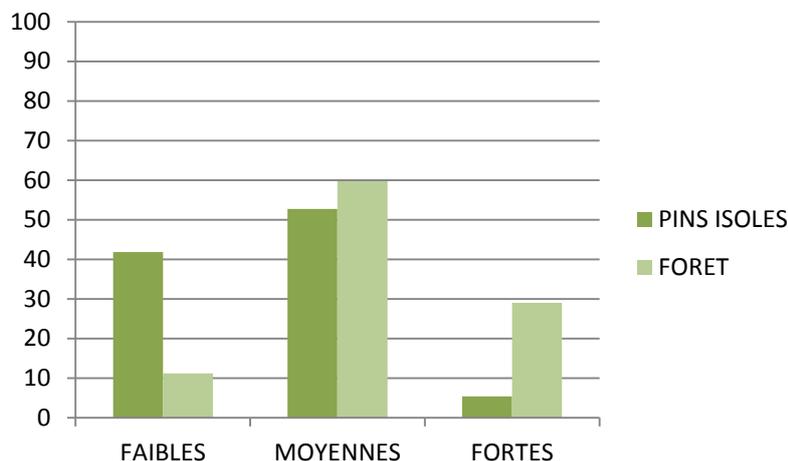


Figure 16 - Répartition des pins sur les différents types de pentes.

- L'altitude

Dans le site d'étude, les individus se situent en moyenne autour de 1878m d'altitude. L'altitude maximale à laquelle un pin a été observé est 2127m, l'altitude minimale est 1585m. Pour analyser la répartition des pins en fonction de l'altitude, 3 classes ont été choisies selon la littérature et le site d'étude :

- De 1500m à 1800m : selon Riou-Nivert (2005), le Pin à crochets ne se développe pas en-dessus de 1700m, or, sur le site d'étude certains sont enregistrés au-deçà de 1700m
- De 1800 à 2000m
- De 2000m à 2400m : selon Riou-Nivert (2005), la limite altitudinale d'une forêt de Pin à crochets est 2400m.

L'analyse bivariée de l'altitude des arbres en fonction de leur âge permet de visualiser les zones altitudinales colonisées selon l'année d'étude (figure 17).

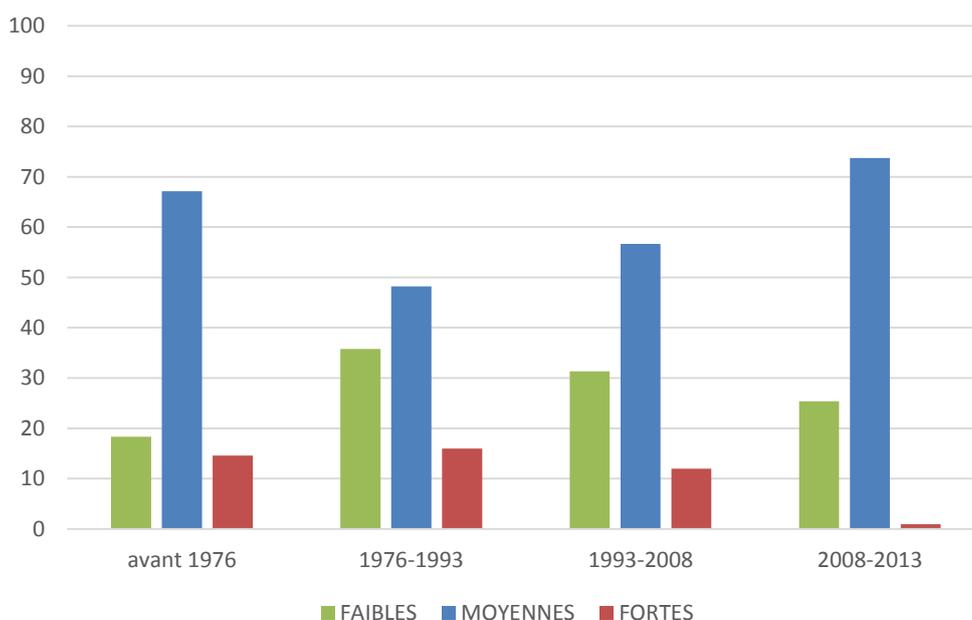


Figure 17 - Répartition des arbres en fonction de leur âge et de leur situation altitudinale

Le graphique ci-dessus permet de constater que globalement les individus se situent à des altitudes moyennes (1800m à 2000m). L'importance des faibles altitudes est expliquée par la dynamique de recolonisation du fond de vallée.

En effet, la figure 18 permet de constater que les pins isolés, arbres pionniers du processus de recolonisation, sont principalement installés sur des zones d'altitudes faibles. L'ancienne pinède se situe entre 1800m et 2000m d'altitude.

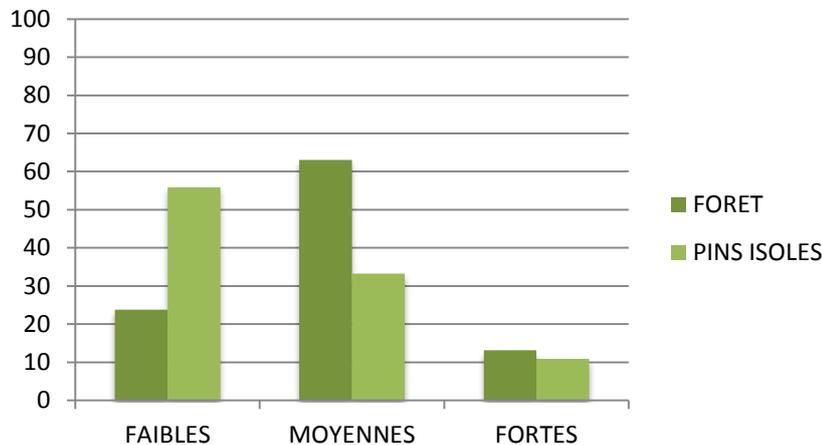


Figure 18 - Répartition des pins sur les différents types d'altitudes

- L'occupation du sol

L'analyse des types préférentiels d'occupation du sol pour l'implantation des pins ne peut être faite que pour les pins apparus entre 2008 et 2013. Seule une classification d'occupation du sol a été réalisée pour 2008. La figure 19 permet de visualiser les types d'occupation du sol colonisés par les individus apparus entre 2008 et 2013.

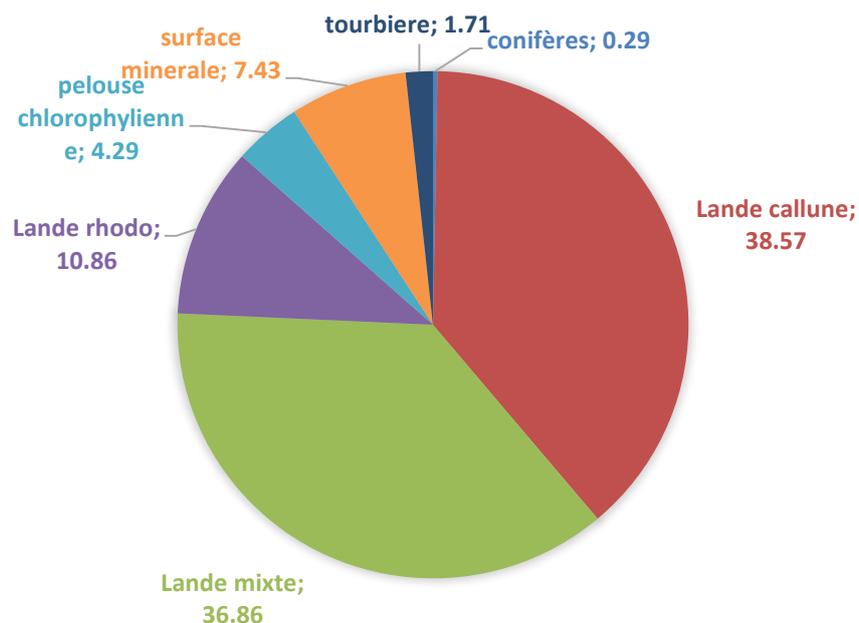


Figure 19 - Pourcentages d'arbres apparus entre 2008 et 2013 en fonction du couvert végétal de 2008

Les landes sont les types de couverts est plus colonisés par les pins, la littérature corrobore cette donnée. Les landes permettent l'infiltration des graines vers le sol et, en même temps, protègent les graines de la dessiccation ou de certains rongeurs. Quelques individus sont identifiés sur les surfaces minérales, en effet, le Pin à crochets est capable de s'implanter sur ce type de substrat souvent démunie de végétation. De même pour les tourbières que le Pin à crochets ne fuit pas.

- La géologie

La carte de géologie utilisée pour analyser les types préférentiels de roche sur lesquelles s'implantent le Pin à crochets dans la vallée de Bassiès n'est pas assez fine. Seulement de types de substrats rocheux sont mis en évidence (1) les moraines, qui sont les dépôts rocheux créé par le déplacement du glacier et (2) les monzogranites à biotites qui sont des roches volcaniques acides.

Les arbres de l'étude se situent à 98% sur des moraines et à 1.6% sur des monzogranites à biotites.

Cette donnée n'est, donc, pas intéressante pour cette étude. La vallée de Bassiès comprend des sols d'origine granitique, ayant une texture grossière, sableuse et caillouteuse. Ce sont des sols pauvres et acides. Ce type de substrat ne représente pas un facteur limitant pour le Pin à crochets.

- Les orientations :

Alors qu'il s'agit d'une espèce héliophile, la forêt de pins dans la zone d'étude se situe en ombrée, comme l'illustre la figure 20.

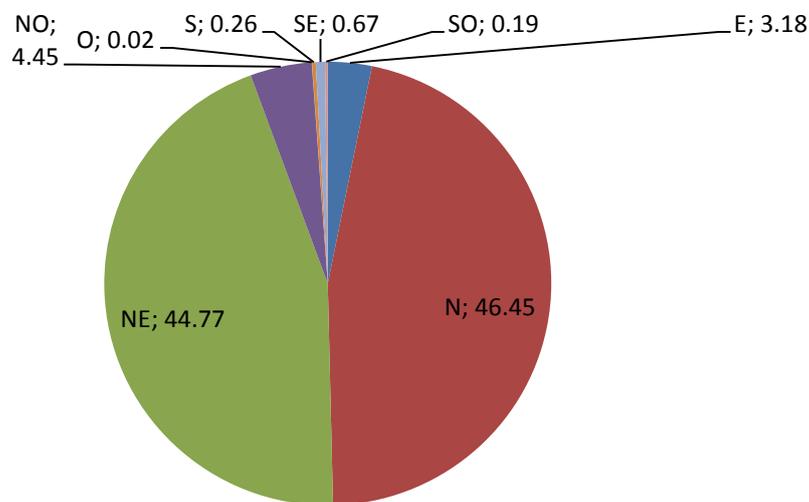


Figure 20 - Implantation de la forêt de Pins à crochets en fonction des orientations

Les pins isolés sont davantage dispersés et colonisent tous types d'orientations. Ils sont davantage présents sur les zones orientées Nord-est, puisqu'ils se développent tout de même proche de la forêt (figure 21).

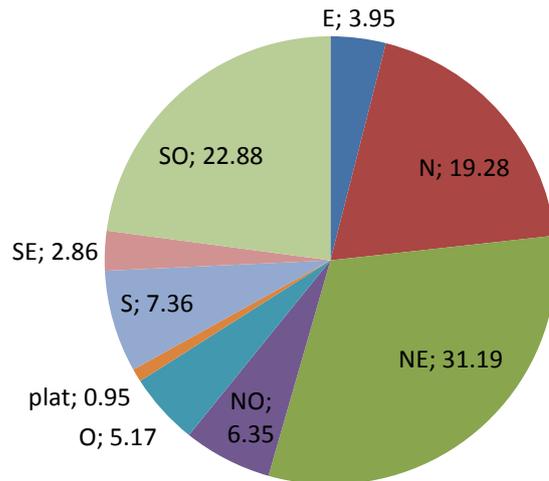


Figure 21 - Implantation des arbres isolés en fonction des orientations

La figure 22 permet de visualiser le processus de colonisation. A partir de 1976, les arbres commencent à s’installer sur des orientations plus variées. En effet, on constate une descente du peuplement vers le fond de la vallée et la montée sur le versant Sud.

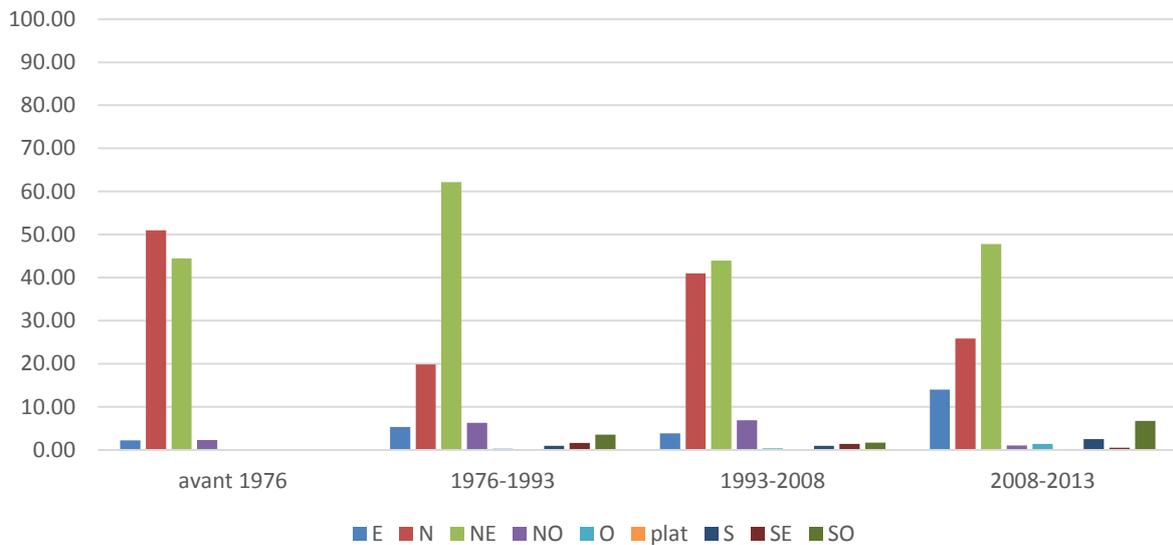


Figure 22 - Pourcentages d’arbres sur les différentes orientations en fonction de l’âge des arbres

La littérature a mis en évidence l’importance de l’orientation dans le bon développement du Pin à crochets. Or, dans la vallée de Bassiès, la forêt de pins est implantée sur un versant Nord. Ce paramètre ne sera donc pas pris en compte dans le modèle.

- La distance au pin le plus proche

Pour analyser les distances entre les nouveaux pins et leur potentiel parent, c’est-à-dire, le pin le plus proche l’année d’étude précédente, les moyennes des distances sont réalisées et sont compilées dans la figure 23.

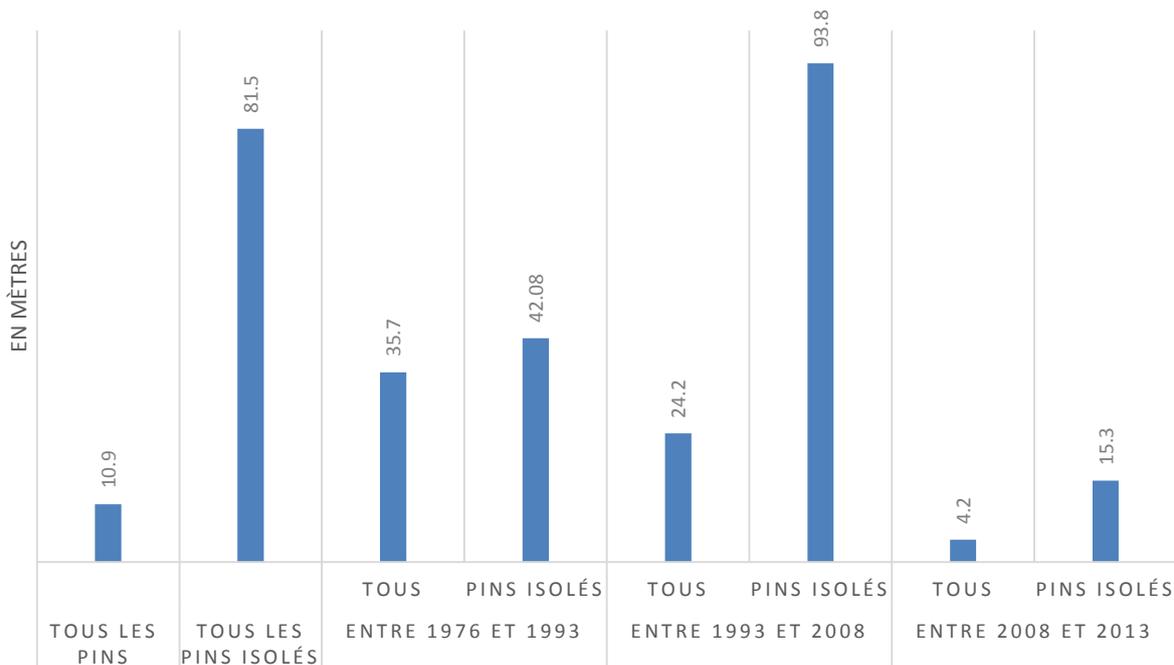


Figure 23 - Moyennes des distances des pins apparus par rapport aux potentiels parents

Pour l'ensemble des pins la distance moyenne de dispersion est faible. Ceci peut être expliqué par la transformation des polygones de forêt en points. Cette manipulation a entraîné la création de milliers d'arbres qui n'existent pas dans la réalité au sein des patches de forêts. Ainsi, les distances entre ces arbres sont très faibles.

Alors, il a semblé important de mettre en évidence la distance moyenne pour les pins isolés. Ces arbres sont les précurseurs de la recolonisation, ainsi, ils s'implantent souvent loin de leurs potentiels parents. C'est entre 1993 et 2008 que les pins isolés gagnent le plus distances par rapport aux arbres existants.

## 2. L'analyse multivariée :

Les statistiques simples ont permis de mettre en évidence des tendances en fonction de chaque variable. L'analyse multivariée permet d'étudier l'ensemble des variables pour mettre en évidence les correspondances entre les variables.

- Description des analyses factorielles

La première phase de cette partie se cantonne à décrire les AFC produites pour comprendre le processus permettant de réaliser la dernière AFC. L'ensemble des graphiques est en annexe 1 du mémoire, il convient de s'y référer pour comprendre la description des AFC.

La première AFC est réalisée avec l'ensemble des variables identifiées comme pouvant avoir un rôle dans les dynamiques spatio-temporelles du Pin à crochets. La dispersion du nuage de point n'est pas concluante. Son aspect étalé met en évidence des modalités qui ne sont pas représentatives des profils d'implantation du Pin à crochets. En effet, les modalités telles que les orientations *plat/O/SE/S/SO* et l'occupation du sol de type *Tourbière* déforment

le nuage de points sur l'axe 1 et 3. Ce premier résultat est corroboré par les statistiques simples effectuées sur les variables *Orientation* et *Occupation du sol*.

Pour réaliser la seconde AFC, les modalités *Orientations plat/O/SE/S/SO* et *Tourbière* ont été retirées des données. La dispersion des modalités est donc différente, le nuage de points est plus compact. Néanmoins, la modalité géologie de type *Monzogranite à biotites* se distingue clairement du reste des modalités, elle se trouve excentrée sur l'axe 3. Elle empêche de percevoir d'autres structures typiques. Ce second résultat est vérifié par les statistiques simples qui indiquent que la carte de géologie n'est pas assez fine pour l'étude et que le substrat de type monzogranite à biotites est très peu colonisé par les arbres ou très faiblement représenté dans la zone d'étude.

La troisième AFC est produite sans la variable *Géologie*. Le nuage de points se disperse de manière plus homogène que lors des analyses précédentes. L'axe 1 semble être défini par la *Distance au pin le plus proche*. Du côté négatif de l'axe, on retrouve la classe de distance la plus faible et les arbres les plus anciens. Du côté positif se situe le reste des classes de distance et les arbres apparus entre 1976 et 1993.

Les orientations s'opposent sur l'axe 3 entre *Nord* et *Nord-est* sur le côté négatif de l'axe, proche du centre de gravité, et les orientations *Est* et *Nord-Ouest* sur le côté positif. Les orientations *Est* et *Nord-Ouest* sont très faiblement représentées par les axes.

L'axe 3 représente aussi l'occupation du sol. Sur le côté négatif de l'axe l'occupation du sol *Conifères* proche du centre du graphique, du côté positif les occupations du sol de type *Minérale*, *Landes* et *Pelouses*. Les pelouses ne sont pas bien représentées dans le graphique.

Les variables *Pentes* et *Altitudes* sont difficiles à interpréter.

La modalité 20 de l'*Age* des arbres n'est pas correctement représentée par le graphique. En effet, les âges se dispersent sur l'axe 2 des plus anciens (côté positif) aux plus récents (côté négatif). La modalité 20 ne suit pas cet ordonnancement. En effet, la modalité représente seulement 0.486 % des individus.

Pour réaliser la quatrième AFC, la modalité *Age 20* a été retirée de l'analyse. La variable âge pourrait être expliquée par l'axe 1. Il oppose les arbres entre pins anciens du côté gauche et arbres récents du côté droit. L'axe 2 explique aussi la variable âge par la gradation des âges le long de l'axe. L'*Age 1* est mal représenté par l'axe 2, en effet, la modalité ne représente que 1.44% des individus. La variable *Age* est, donc, représentée par l'axe 1 qui oppose les arbres anciens (côté négatif) et les arbres récents (côté positif) et sur l'axe 2 par une gradation.

Les orientations sont expliquées par l'axe 2. Les modalités *NE* et *N* sont davantage représentées dans le graphique. L'axe oppose les orientations *NE* et *E* (côté négatif) et les orientations *NO* et *N* (côté positif). L'axe 3 place les orientations *N* et *NE* au centre du graphique. A l'inverse il pousse les orientations *E* et *NO* en dehors du nuage de points. En effet, ces orientations représentent seulement 3.2 et 4.5% des individus alors que les deux autres rassemblent 91% des individus.

Les distances aux arbres les plus proches sont représentées sur l'axe 1 avec les plus petites distances du côté négatif et toutes les autres du côté positif. La classe 1 de distance représente 50% des individus, la classe 2 12%. Sur l'axe 2, les distances se dispersent selon une gradation avec les plus fortes distances du côté positif de l'axe.

L'AFC 5 est réalisée suite à la suppression de la variable *Occupation du sol*. Cette variable semble aberrante, par exemple, les pelouses sont très mal représentées par le graphique alors que le site d'étude se situe dans une zone d'estive. La carte d'occupation du sol utilisée est la classification de 2008, il est, donc, normal qu'elle ne fonctionne pas pour les individus présents avant 2008. Cette modification ne change pas la dispersion des modalités, elle n'a pas un impact fort sur la structure du graphique. Elle tend à mettre davantage en

évidence les modalités extrêmes de type *Altitude 10*, les orientations *Nord-Ouest* et *Est* ou *Age 1*.

Les structures mises en évidence dans les AFC précédentes sont les mêmes : dispersion de l'âge et des distances sur les axes 1 et 2.

De plus, il semble que les variables *Pentes* et *Altitudes* se dispersent de manière à former des faciès topographiques particuliers. Les pentes fortes correspondent à des altitudes moyennes et les pentes moyennes à des altitudes relativement fortes.

Pour la dernière analyse factorielle, la classe de distance 1 est retirée de l'AFC. Cette classe de distance assemble les individus qui se développent au sein de la forêt. Il est intéressant de voir comment se dispersent les modalités sans cette variable.

Dans cette représentation, la distance est bien expliquée par l'axe 1 qui forme une gradation des plus fortes distances vers les plus faibles. Néanmoins, il est maintenant difficile de le mettre en relation avec l'âge des arbres. En effet, l'âge 5 se situe à l'origine du graphique, alors que l'âge 1 est très excentré sur les axes 2 et 3. Au regard des statistiques, l'âge 1 ne représente que 2.9% des individus.

L'AFC 6 met en évidence les mêmes structures pour les *Orientations*, les *Pentes* et les *Altitudes*. Les orientations *Est* et *Nord-Ouest* déforment le nuage de points, elles ne représentent pas des positions préférentielles des pins. Les *Pentes* et les *Altitudes* forment des faciès topographiques mis en évidence dans l'AFC 5.

En résumé, les AFC permettent de faire émerger trois grandes structures dans les données. D'abord, on peut distinguer les zones préférentielles d'implantation du pin. Ces sont des zones orientées Nord-est ou Nord, avec des pentes et des altitudes moyennes. Ces informations sont corroborées par les résultats des statistiques simples. Ensuite, il existe une opposition entre les arbres anciens et arbres récents. Cette opposition est marquée par des arbres anciens qui se situent sur des altitudes plus élevées que les arbres jeunes. Pour finir, les AFC permettent de mettre en évidence des profils topographiques. La CAH réalisée par la suite, permet de visualiser concrètement ces profils.

- Description de la CAH

Au regard de la dernière AFC, une classification ascendante hiérarchique (CAH) est réalisée pour mettre en évidence des classes d'individus en fonction de leur milieu d'implantation. Cette classification permet de mettre en évidence sept faciès représentants des milieux d'implantation des pins.

La figure 24 met en évidence les effectifs d'individus par classe. La représentativité des modalités dans chaque classe est mise en évidence par les graphiques de l'annexe 2.

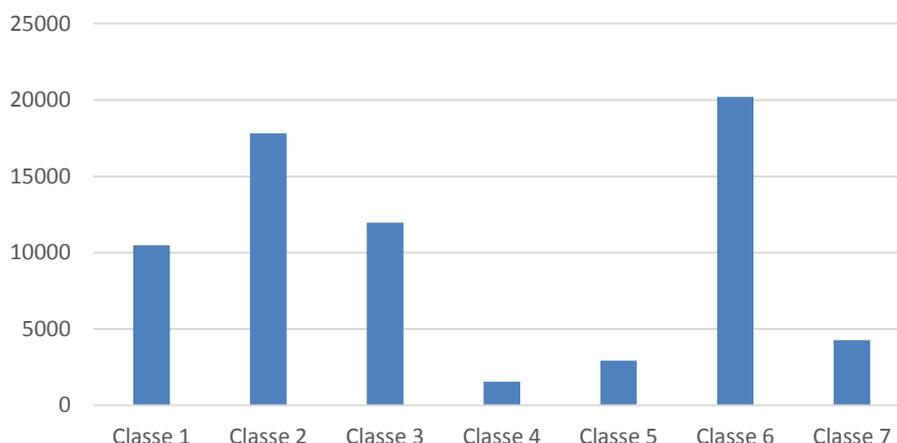


Figure 24 - Nombre d'individus par faciès topographiques identifiés par la CAH

- La classe 1 est représentée par les arbres apparus entre 1993 et 2008. Ces arbres se situent sur des surfaces orientées Nord-est et Nord et sur des pentes faibles (de 0 à 24°). Ce sont des arbres proches de l'ancienne forêt. Le paramètre altitude indique que ce sont des arbres situés à la fois sur des surfaces de hautes altitudes (plus de 2000m) et très basses (1500m).
- La classe 2 est essentiellement représentée par les arbres apparus entre 1993 et 2008. Ils sont principalement localisés sur des surfaces orientées Nord-est, à des altitudes moyennes (entre 1850 et 1950m), sur des pentes moyennes (entre 30 et 40%). Comme la classe 1, ce sont des arbres proches des anciens patchs de forêt.
- Dans la classe 3 sont reportés les arbres ayant entre 20 et 5 ans. L'orientation Nord-est est presque exclusivement représentée dans cette classe. Les arbres sont situés à des altitudes relativement élevées (entre 1900 et 1980m d'altitude) et sur des pentes relativement faibles (entre de 27 à 30%). Ce sont des arbres qui se sont implantés à proximité de leurs congénères.
- La classe 4 est caractérisée par une part importante d'arbres apparus entre 2008 et 2013, même si les arbres ayant au moins 5 ans dominent toujours la classe puisqu'ils sont cent fois plus nombreux que ceux ayant au moins 1 an. Cette classe est celle où l'on trouve le moins d'arbres apparus entre 1993 et 2008. Ces arbres se situent majoritairement voire exclusivement sur les surfaces exposées à l'Est. Leur altitude est variable entre de très faibles altitudes (1700 m), des altitudes moyennes (1850m) et de fortes altitudes (plus de 2100m). Néanmoins, il se trouve sur des pentes très faibles (entre 19 et 24%). Ce sont principalement des arbres isolés.
- La classe 5 est caractérisée par des arbres qui ont entre 20 et 5 ans et qui se situent sur des surfaces orientées Nord-ouest. Ces individus sont principalement à de fortes altitudes (plus de 2100m), mais une part non négligeable se trouve à de faibles altitudes (1700m). Ils se situent principalement sur des pentes relativement fortes (entre 34 et 40°), et moins de 20% des individus se situent sur des pentes très faibles (moins de 19°). Ces arbres se sont implantés proche de leurs congénères (plus 15m).
- La classe 6 est représentée par des arbres apparus entre 1993 et 2008 et situés sur des surfaces orientées au Nord. Ces individus se situent à des altitudes faibles (entre 1700 et 1870m) et de fortes pentes (plus de 44%). Ce sont principalement des arbres implantés à plus de 10m de leurs congénères les plus proches.
- La classe 7 est représentée par des arbres apparus entre 1993 et 2008 et se trouvant sur des surfaces orientées Nord et Nord-ouest majoritairement. Ces individus se situent à des altitudes faibles (entre 1720 et 1780m) et des pentes relativement fortes (plus de 40°). Ce sont principalement des arbres implantés à plus de 13m de leurs congénères les plus proches.

Pour comprendre l'organisation spatiale des classes d'individus, celles-ci sont cartographiées au sein du site d'étude.

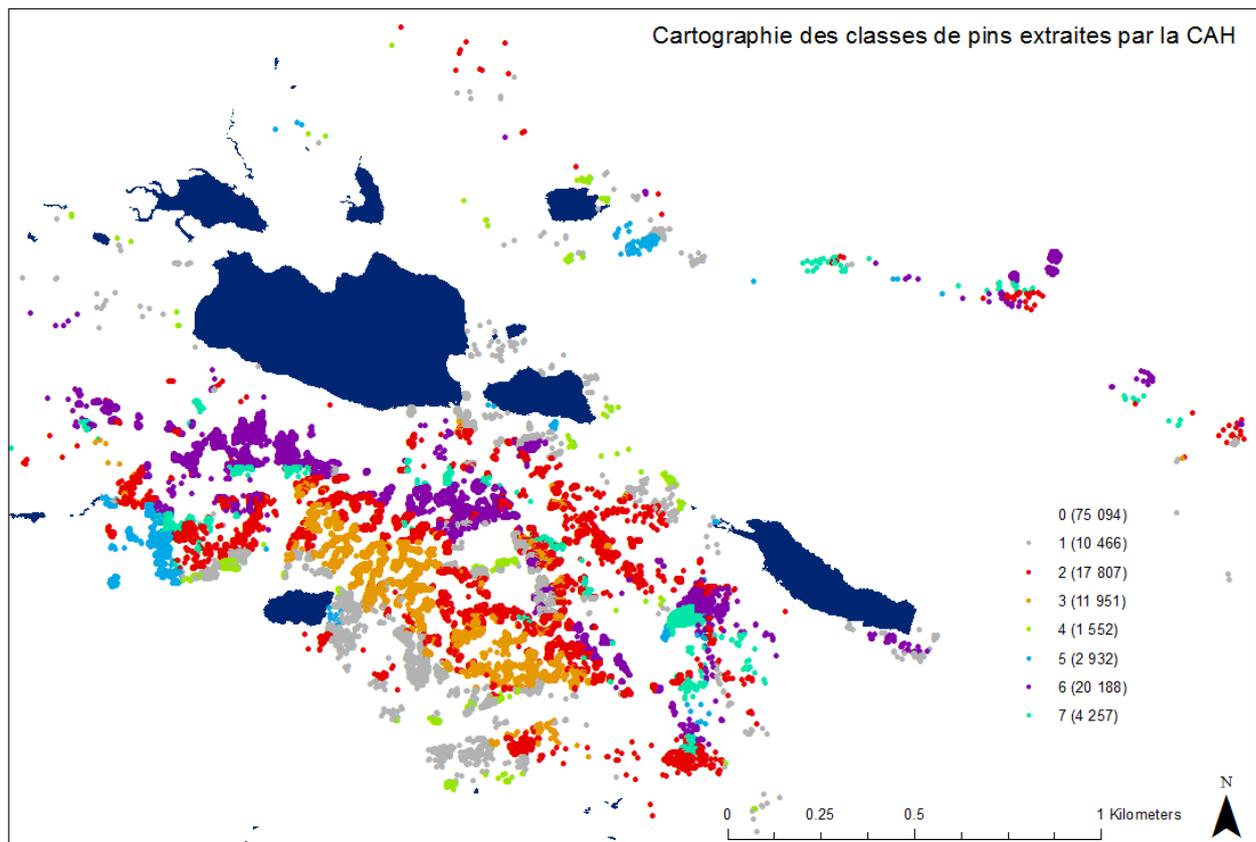
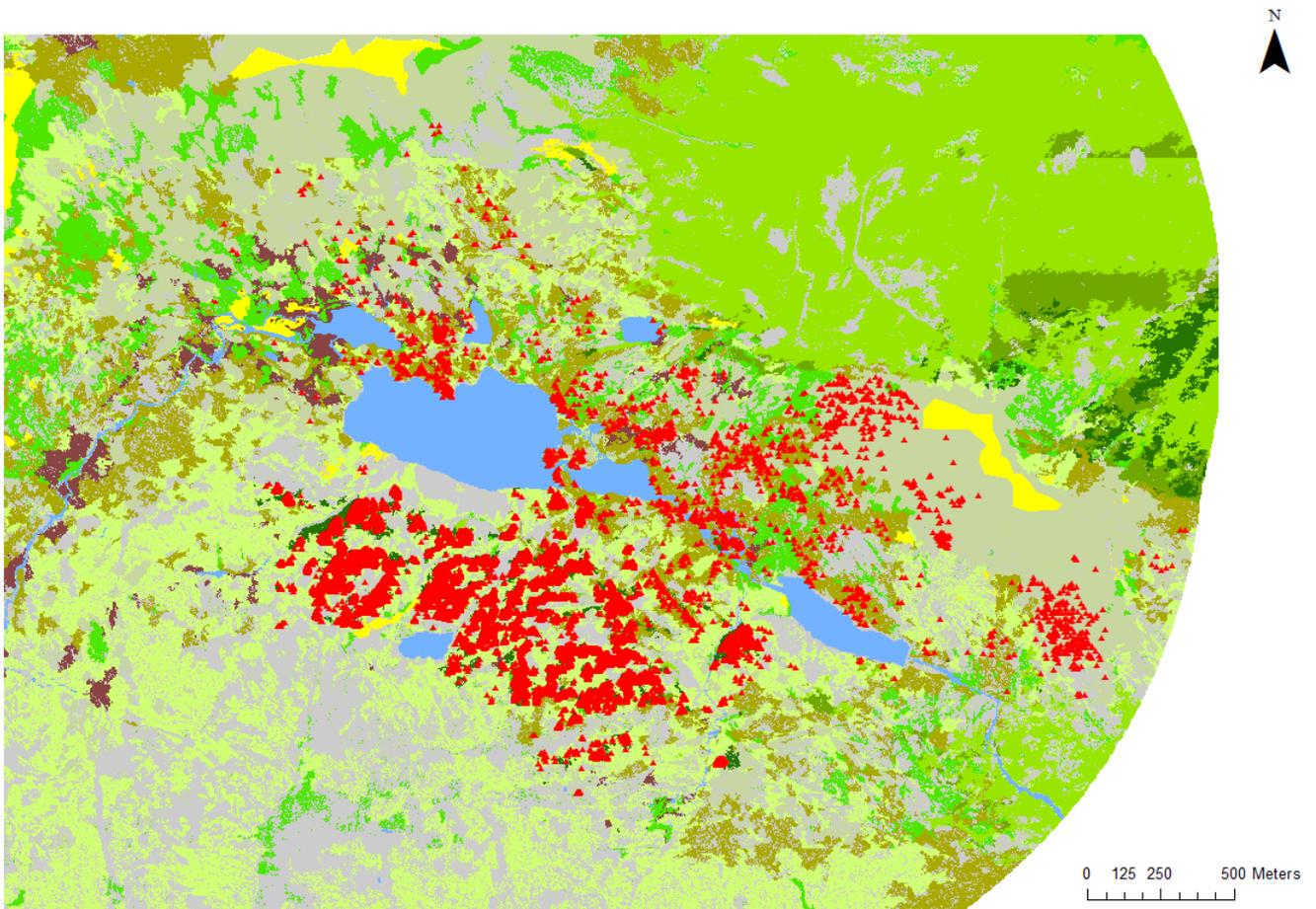


Figure 25 - Cartographie des classes d'individus extraites à partir de la CAH

La figure 25 permet de visualiser la distribution spatiale des individus selon leur classe. Il est possible d'analyser certaines classes selon le critère altitudinal. Les classes 3 et 6 semblent assembler des individus implantés dans une même tranche d'altitude.

L'analyse des représentativités des modalités dans chaque classe a mis en évidence l'importance de l'orientation et des distances dans la création des faciès. La dispersion spatiale des classes peut, alors, être liée à l'orientation des surfaces et à la distance entre les pins.

La figure 26 met en exergue les individus retirés de l'AFC. Les dynamiques de remontée du pin sur le versant Sud du Pic du Far et les individus présents sur les tourbières à l'ouest de l'Etang majeur ne sont pas caractérisés par l'AFC.



*Figure 26 - Cartographie des pins éliminés de l'AFC*

L'ensemble de l'analyse statistique met en évidence l'importance de certaines variables telles que l'orientation, la distance et l'âge des arbres. Ce résultat permet de mettre en lumière deux patterns de recolonisation spatiale. Le premier est réalisé par l'expansion de proche en proche des patches de forêts existant, le second par la dispersion lointaine de pins isolés.

## B. Calibrage du modèle

### 1. Test de robustesse

La simulation 1 présente la diffusion spatiale des individus simulés par le modèle entre 1993 et 2008. Les paramètres sont calibrés pour caractériser les dynamiques spatio-temporelles au plus proche de la réalité. Les valeurs paramétriques sont donc choisies en fonction de données empiriques et issues de la littérature. Ce test est mis au point en vue de comparer les résultats avec la réalité et mettre en évidence la robustesse du modèle (figure 27).

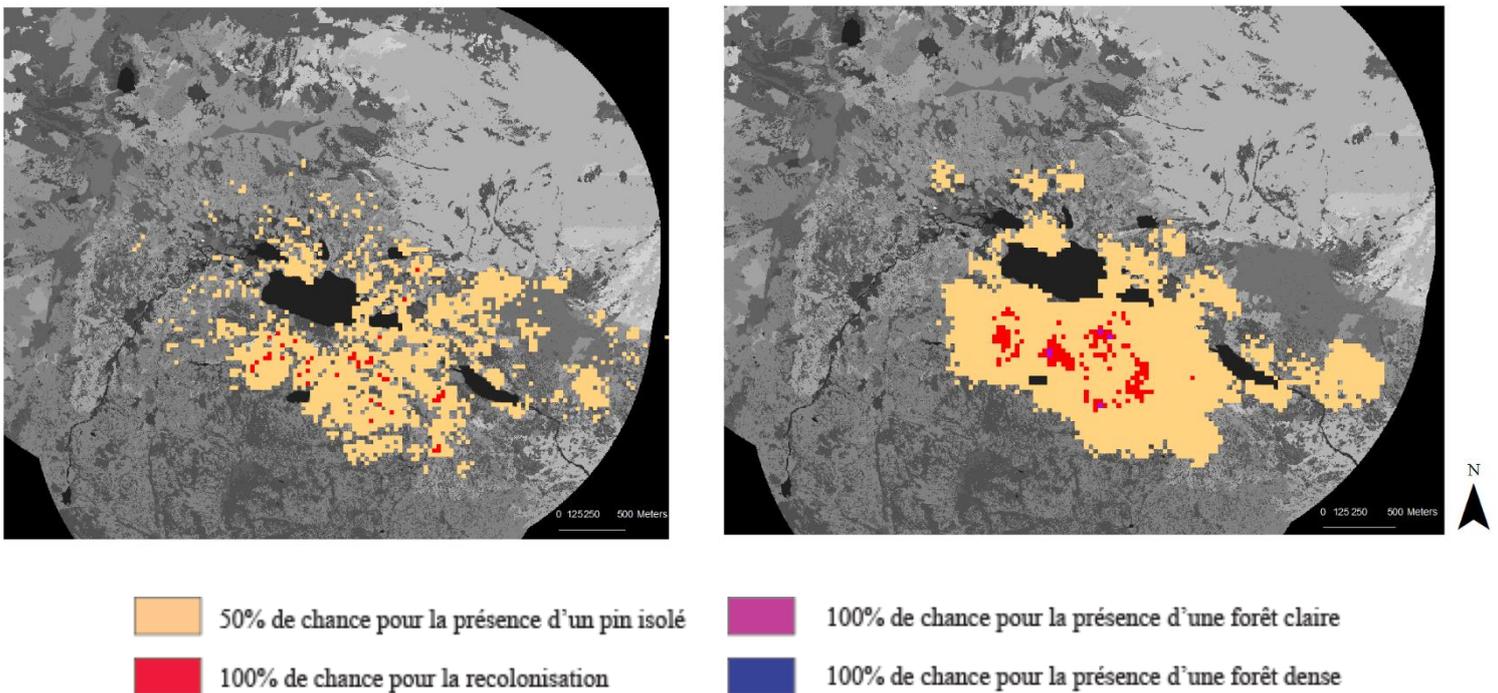


Figure 27 - Comparaison entre la carte réelle (à gauche) de dispersion des individus en 2008 et la carte de simulation 1 (à droite)

La comparaison des cartes réelle et simulée met en évidence une dispersion spatiale des individus différente. Sur le plan quantitatif, la simulation prédit un nombre d'arbres très proche de la réalité (simulé : 11 760 arbres / réalité : 11 810 arbres). La figure 27 montre que la simulation est moins au point dans la localisation des individus. La dispersion des arbres est davantage concentrée par rapport à la réalité.

Une carte des allocations spatiales est donc réalisée pour mettre en relief les différences de densité de forêt pour chaque pixel (figure 28).

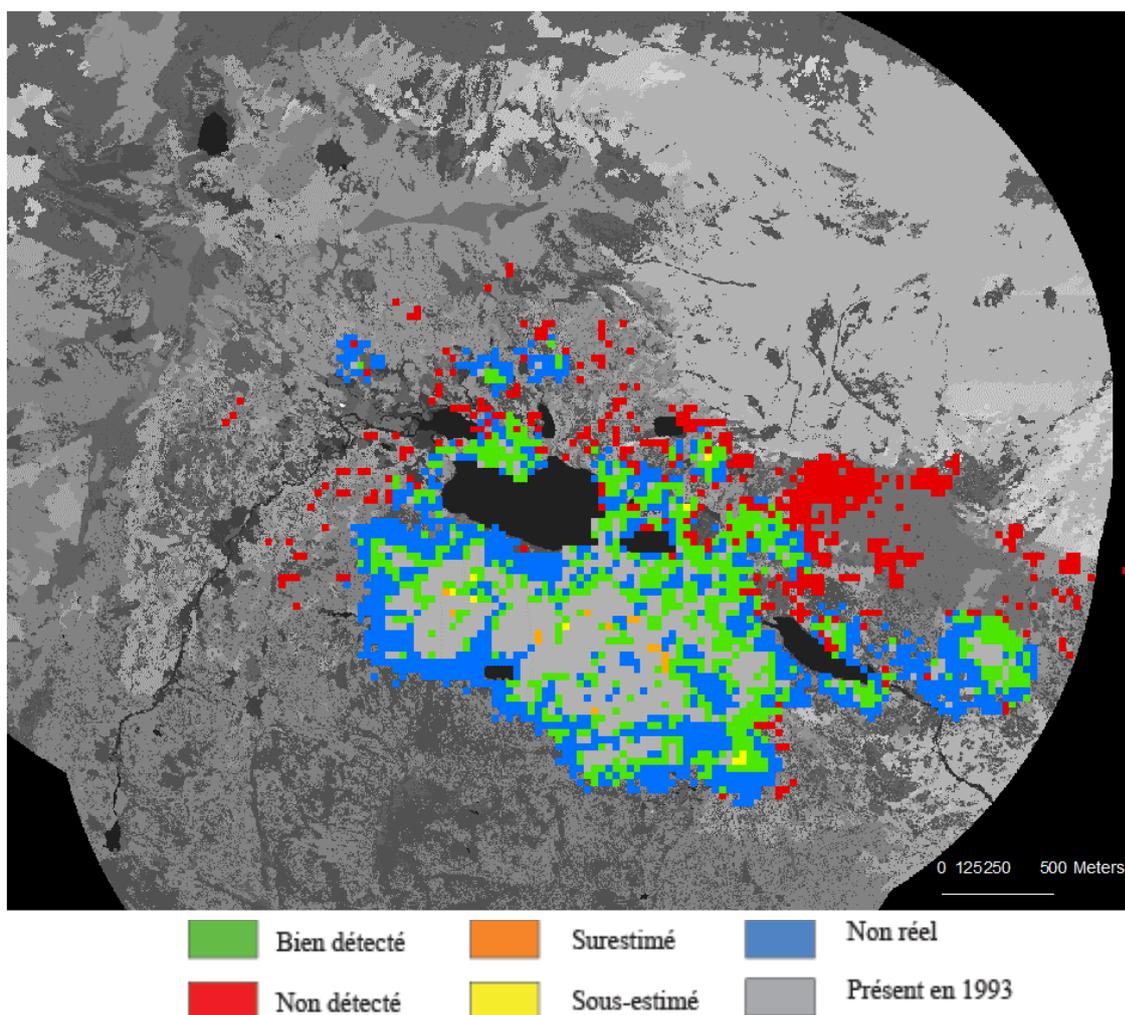


Figure 28 - Carte des allocations spatiales issues de la Simulation 1 par rapport à la réalité

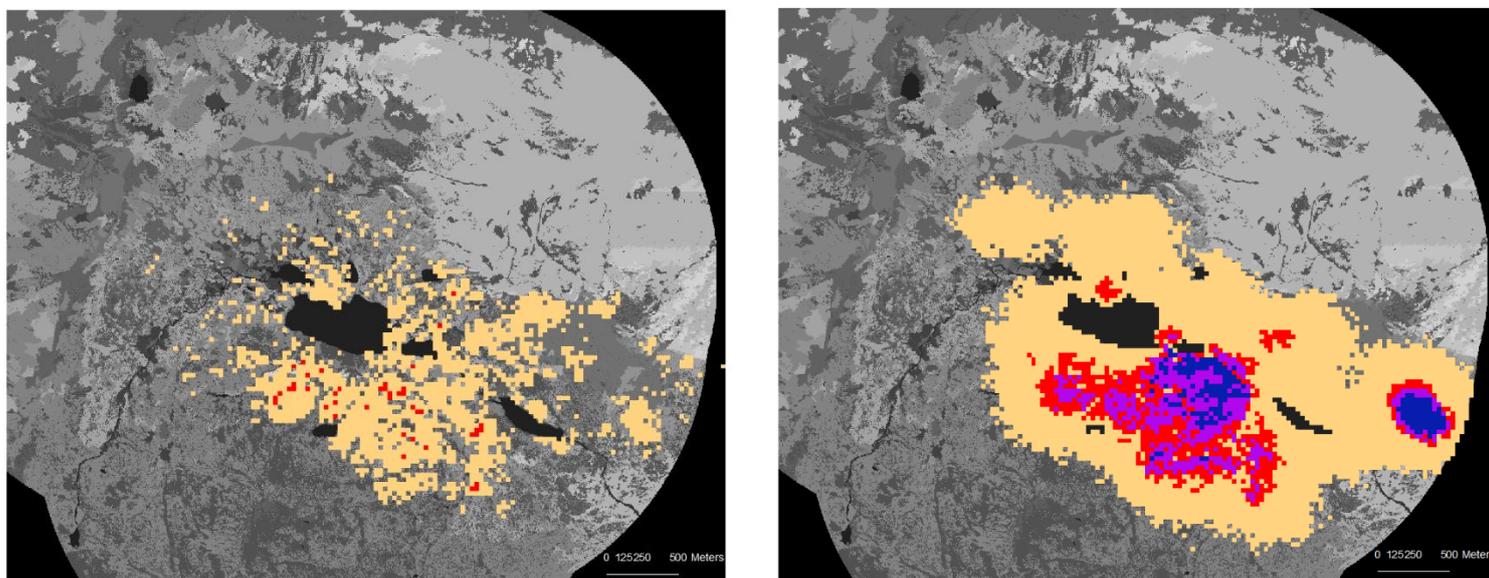
La comparaison entre la diffusion simulée et la réalité donne une impression de surestimation de la densité de pin par le modèle. Or, les quantités de pins sont respectées. La comparaison des allocations spatiales dans la figure permet de comprendre que le modèle simule une expansion du pin en tâche d'huile autour des individus présents en 1993. Ce qui induit l'importance des pixels pour lesquelles la densité de pin est surestimée. Cette simulation prédit une densification de la forêt, puis une expansion de proche en proche. Des dynamiques ne sont donc pas représentées. La remontée des arbres sur le Pic du Far et la dispersion des individus par les pins isolés sont des réalités que cette simulation n'a pas mises en évidence.

## 2. Tests de sensibilité des paramètres

Au regard des résultats obtenus pour la Simulation 1, il est nécessaire de comprendre l'influence de chaque paramètre. Connaître la sensibilité des paramètres peut permettre de mettre en place une simulation qui s'approche davantage de la réalité.

- Influence de l'âge dans la production des graines

L'âge a été identifié comme facteur prépondérant de la production des graines. Un nombre de graine produite par arbres et par an a été défini selon la littérature. La simulation 1 prend en compte ce facteur. Alors que se passe-t-il lorsque que tous les arbres produisent le même nombre de graines ?



*Figure 29 - Comparaison entre la carte réelle (à gauche) de dispersion des individus en 2008 et la carte de simulation 2 (à droite)*

La comparaison entre la Simulation 2 et la réalité atteste de l'impact de la variation du paramètre *Age* (figure 29). Dans cette simulation tous les arbres produisent 622 graines, les jeunes arbres compris. Une proportion plus importante de graines est envoyée, il y a donc davantage de chance qu'un grand nombre de graines germine. En effet, on dénombre 73 435 arbres en 2008 pour la simulation contre 11 810 en réalité.

Cette simulation permet de comprendre que le paramètre *Age* est important à prendre en compte sur le plan quantitatif. Il s'agit maintenant d'analyser les allocations spatiales des individus pour analyser les conséquences sur le plan spatial (figure 30).

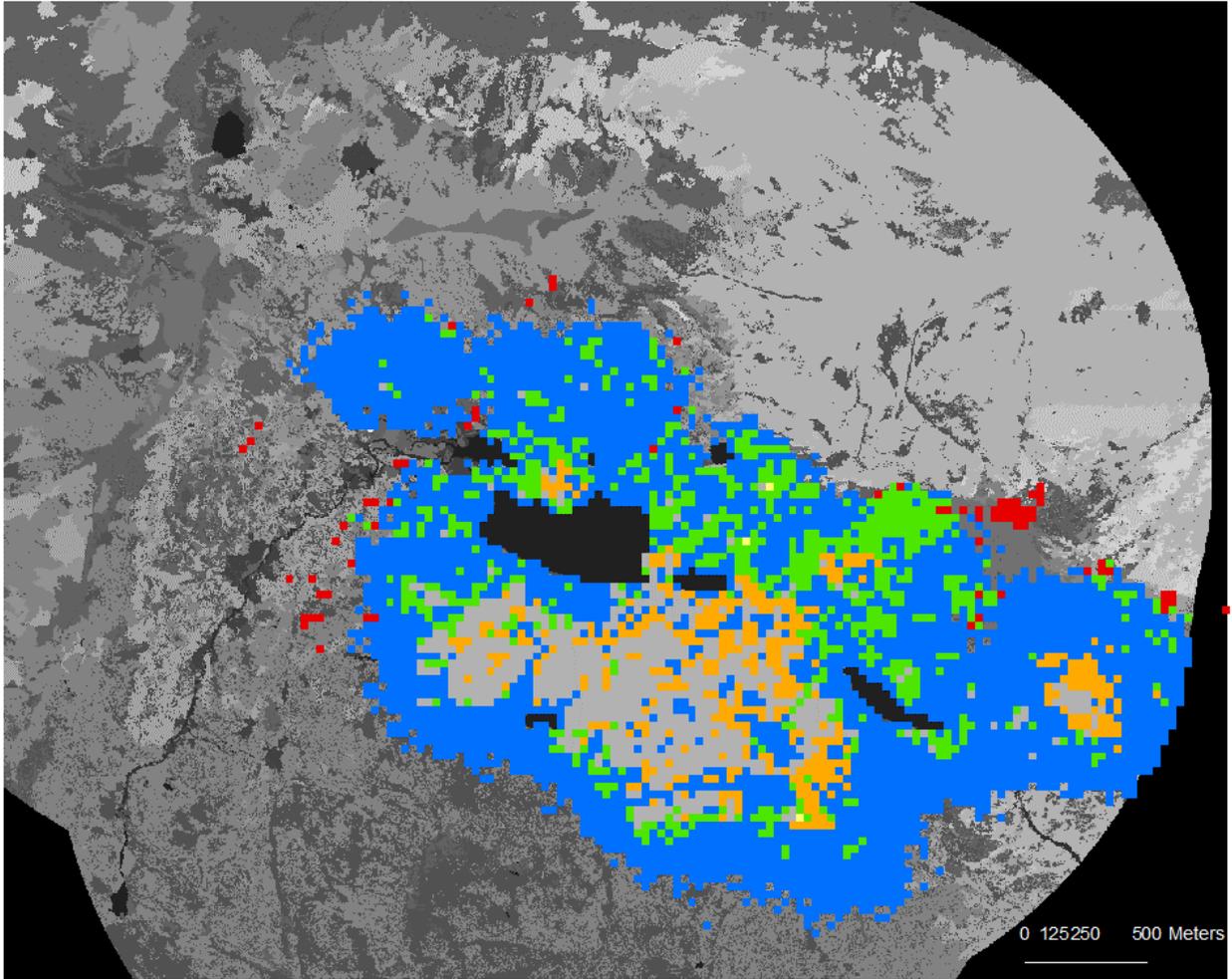
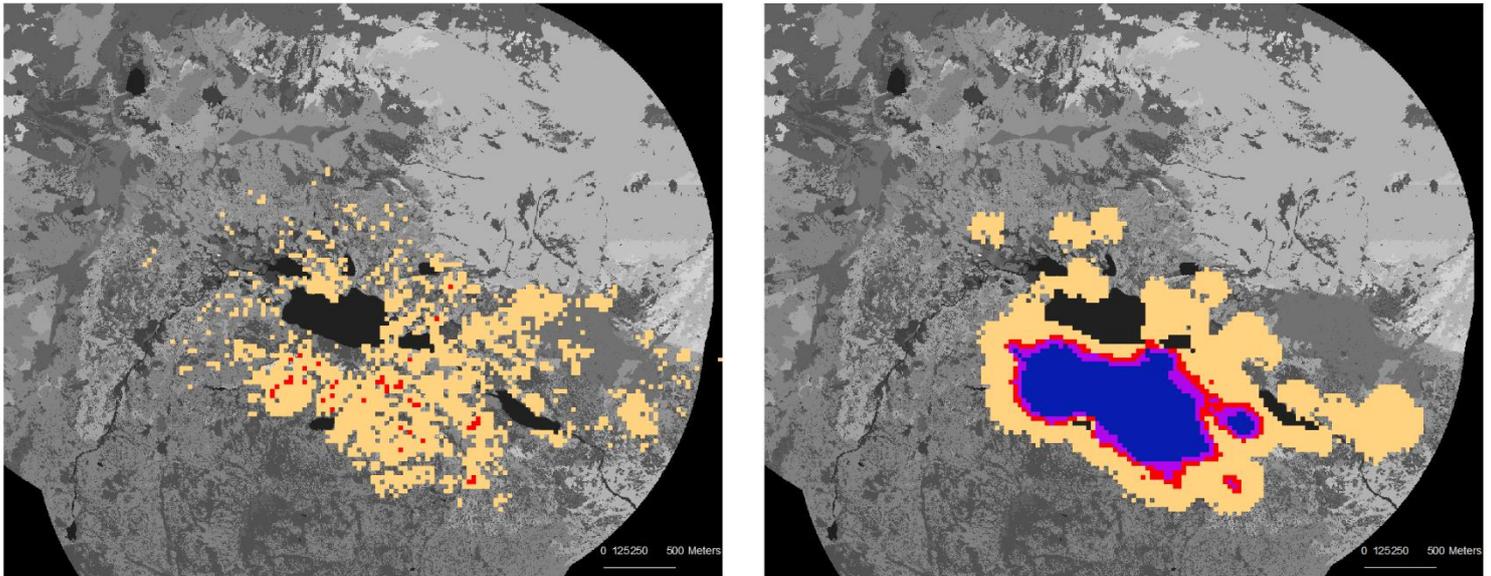


Figure 30 - Carte des allocations spatiales issues de la Simulation 2 par rapport à la réalité

Dans la Simulation 2, on retrouve le type de dynamique spatiale propre au modèle créé. En effet, la forêt a tendance à se développer par une densification de proche en proche. Cette dynamique permet un faible taux de zones non détectée. L'expansion en tâche d'huile couplée avec la forte quantité d'arbres en plus par an entraîne la sur-estimation des densités en zone de forêt claire et la recolonisation minutieuse des espaces autour des arbres présents en 1993.

- Influence de l'occupation du sol dans la germination des graines

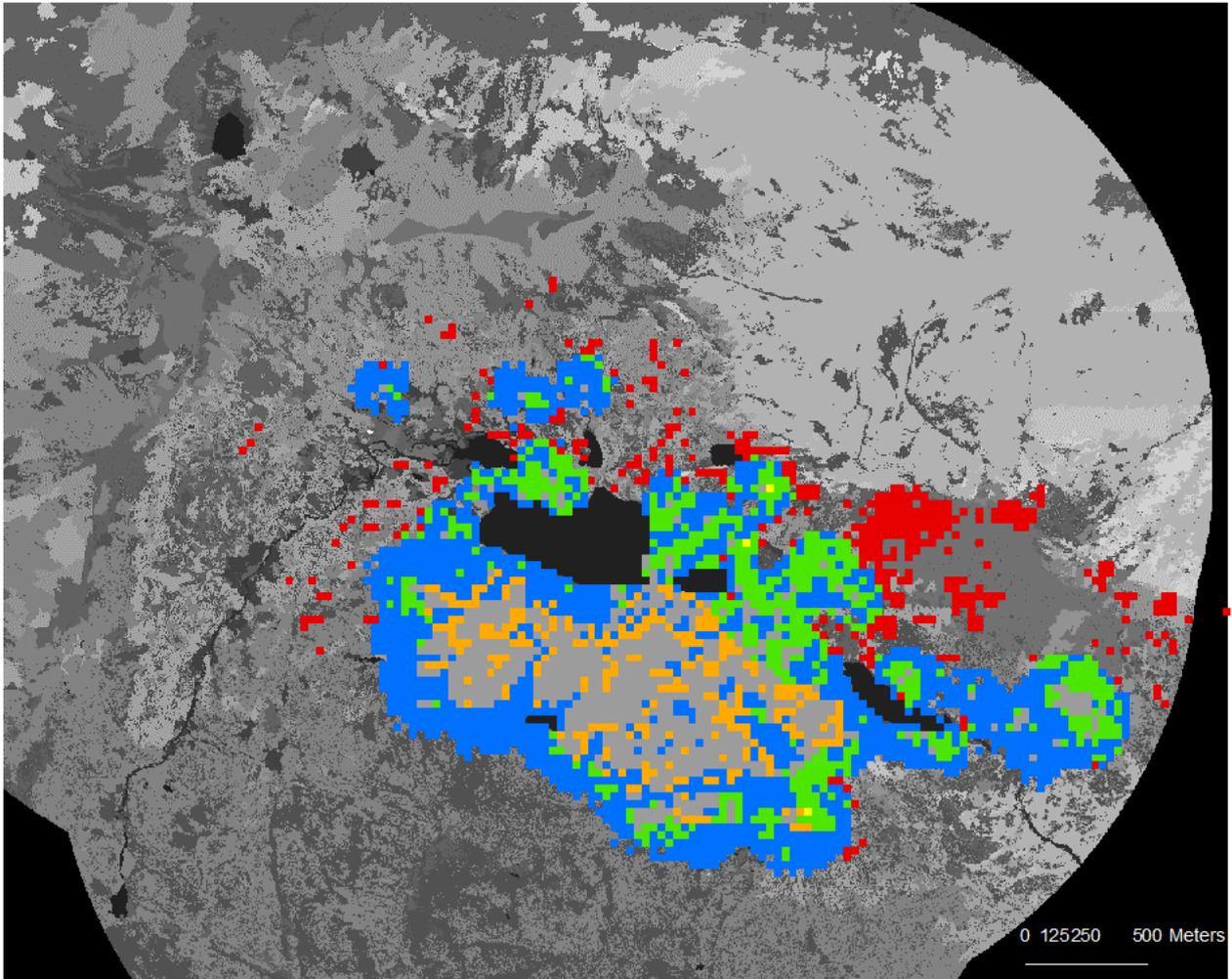
La Simulation 3 est mise au point pour mesurer l'impact du facteur *Occupation du sol* dans la paramétrisation du modèle. La germination des graines est liée au type de couvert végétal sur lequel la graine tombe. Les probabilités empiriques de germination en fonction de l'occupation du sol sont donc retirées du modèle, chaque type de couvert à la même probabilité de germination. Comment les individus se dispersent-ils dans l'espace selon ce calibrage (figure 31) ?



*Figure 31 - Comparaison entre la carte réelle (à gauche) de dispersion des individus en 2008 et la carte de Simulation 3 (à droite)*

Sur le plan quantitatif, le modèle multiplie par presque cent le nombre d'arbres présents en 2008 (109 621 contre en réalité 11 810 arbres). Sur le plan spatial, le fait de retirer les probabilités de germination en fonction de l'occupation du sol révèle davantage la tendance du modèle à faire évoluer la forêt en tâche d'huile. On peut constater un gradient de densité partant de la zone de l'ancienne pinède et se propageant autour de manière concentrique. Sans la contrainte d'occupation du sol, les arbres se développent principalement proche leurs parents et colonise petit à petit des abords de la forêt.

La simulation surestime donc les densités dans les zones anciennement enforestées, alors qu'il ne détecte pas les pins isolés qui se développent à l'Est et au Nord de la zone d'étude (**figure**).

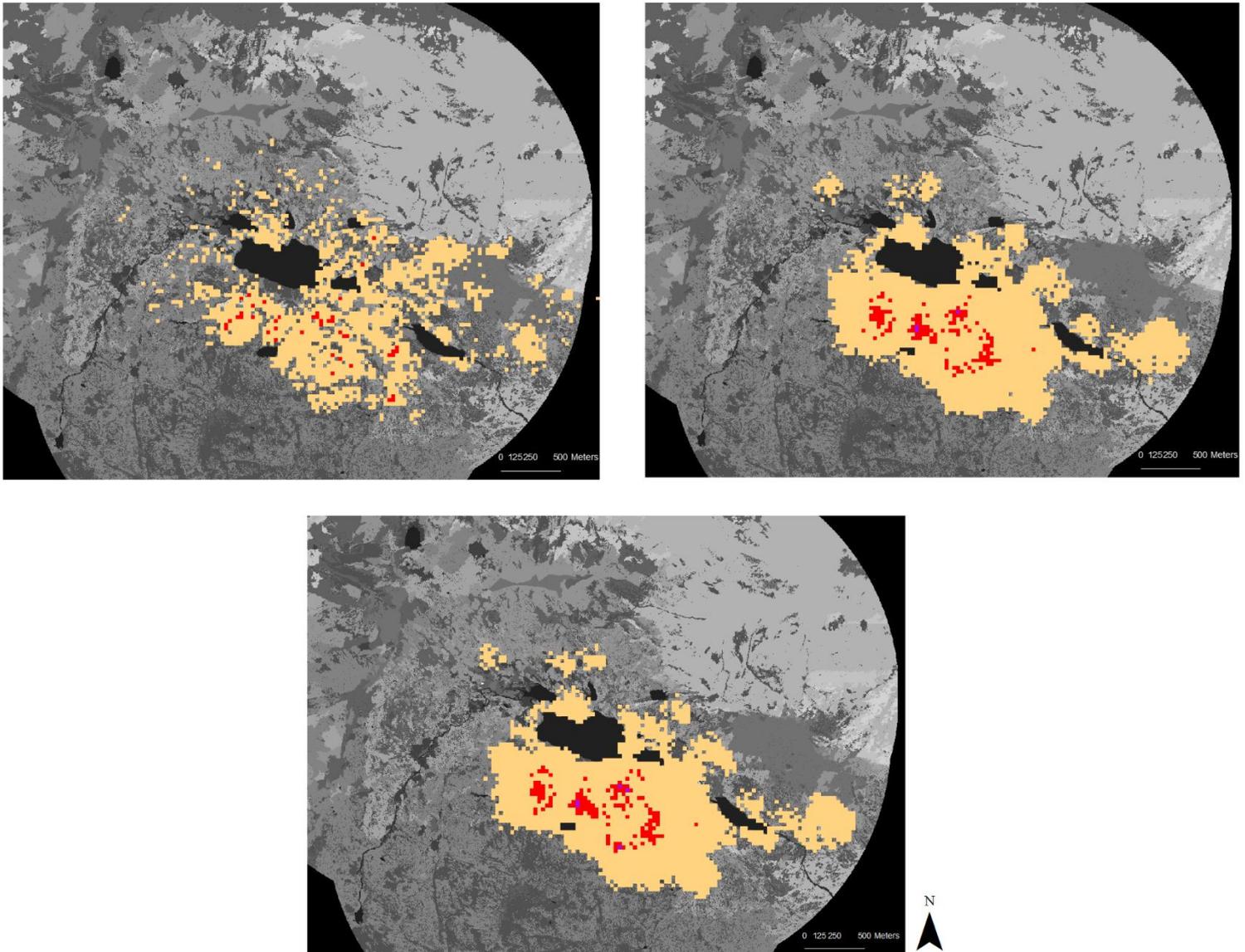


*Figure 32 - Carte des allocations spatiales issues de la Simulation 3 par rapport à la réalité*

Sans la contrainte du couvert végétal la forêt se densifie fortement pour ensuite coloniser et densifier les abords des zones de forêt. Le facteur limitant lié à l'altitude empêche la forêt se développée vers le Sud du site d'étude. On observe alors une dynamique de descente de la recolonisation vers le fond de vallée.

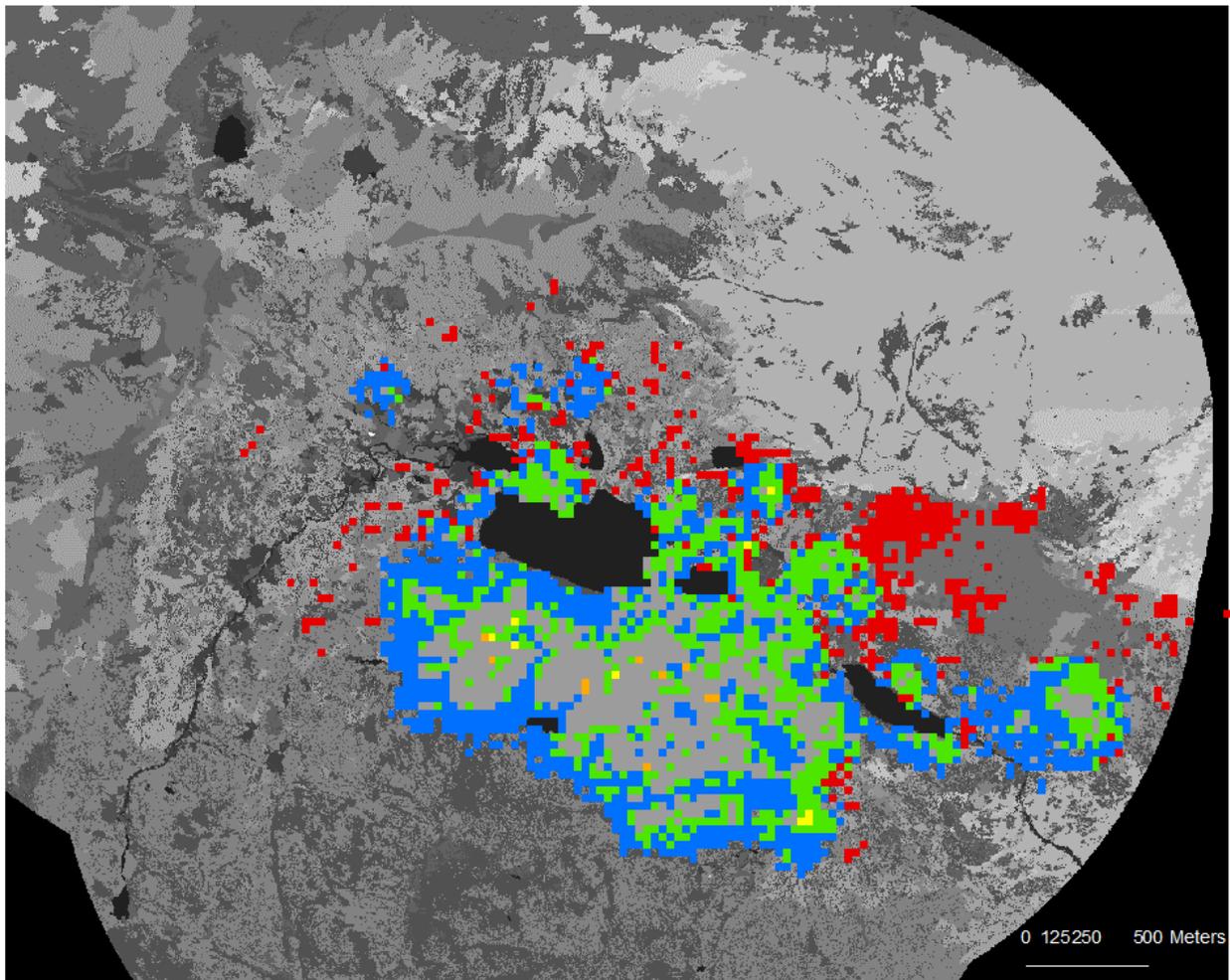
- Influence de la direction du vent dans l'organisation spatiale des individus

Le vent a été identifié comme un facteur prépondérant dans le processus de recolonisation de la forêt. Notamment pour une essence telle que le pin à crochet dont les graines sont munies d'une aile. Ce facteur est pris en compte par la mesure des directions de vent possibles durant la période de dissémination des graines. Alors que se passe-t-il lorsqu'on retire ce paramètre du modèle ? La figure 33 donne une illustration de la dispersion spatiale des individus lorsqu'on retire ce paramètre.



*Figure 33 - Comparaison entre la carte réelle (en haut à gauche) de dispersion des individus en 2008, la carte de Simulation 1 (en haut à droite) et la carte de Simulation 4 (en bas)*

Pour cette simulation il est judicieux de comparer visuellement les dynamiques réelles à celles observées dans la Simulation 4, mais aussi les concordances entre les Simulations 1 et 4 (figure 33). Cette comparaison permet d'observer les mêmes dynamiques spatiales entre les Simulations 1 et 4. La carte d'allocation est présentée (figure 34), elle ressemble fortement à celle de la Simulation 1.



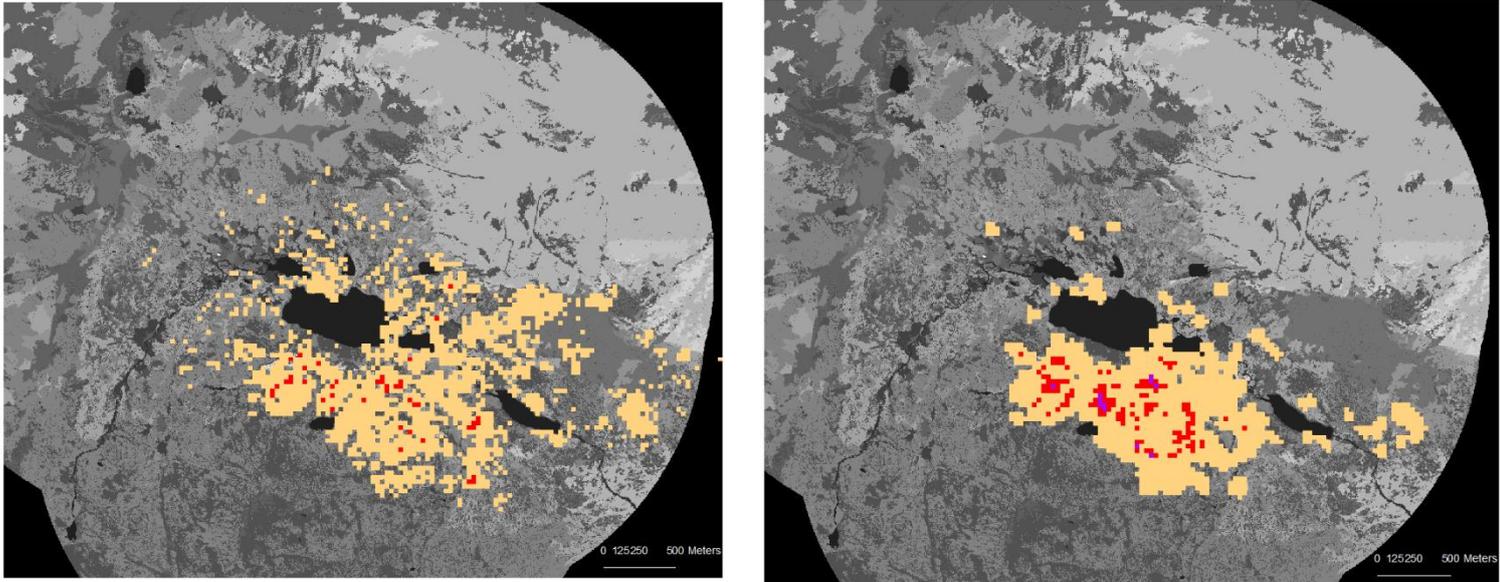
*Figure 34 - Carte des allocations spatiales issues de la Simulation 3 par rapport à la réalité*

La prise en compte des directions change peu les dynamiques spatio-temporelles. Trois causes sont supposées, (1) la paramétrisation du facteur n'est pas adaptée et les probabilités doivent être revues, (2) la direction du vent influence que très peu les dynamiques de recolonisation ou (3) l'effet d'expansion en tâche d'huile repéré provoque la disparition des dynamiques liées à la direction du vent. Dans ce cas, une augmentation des distances de dispersion pourrait être la solution à la visualisation des effets de la direction du vent.

- Influence de la force du vent et de la proximité au parent dans l'organisation spatiale du peuplement

Pour analyser l'influence de la dispersion des individus en fonction de la distance au parent, le paramètre vent est utilisé de nouveau. Deux simulations ont été réalisées, la première simule la répartition des arbres sur de courtes distances (entre 0 et 40m par rapport à l'arbre semencier) et la seconde prédit la distribution des individus sur de grandes distances (entre 0 et 200m de l'arbre semencier). Quel est l'impact de ce calibrage sur la dispersion de la forêt ?

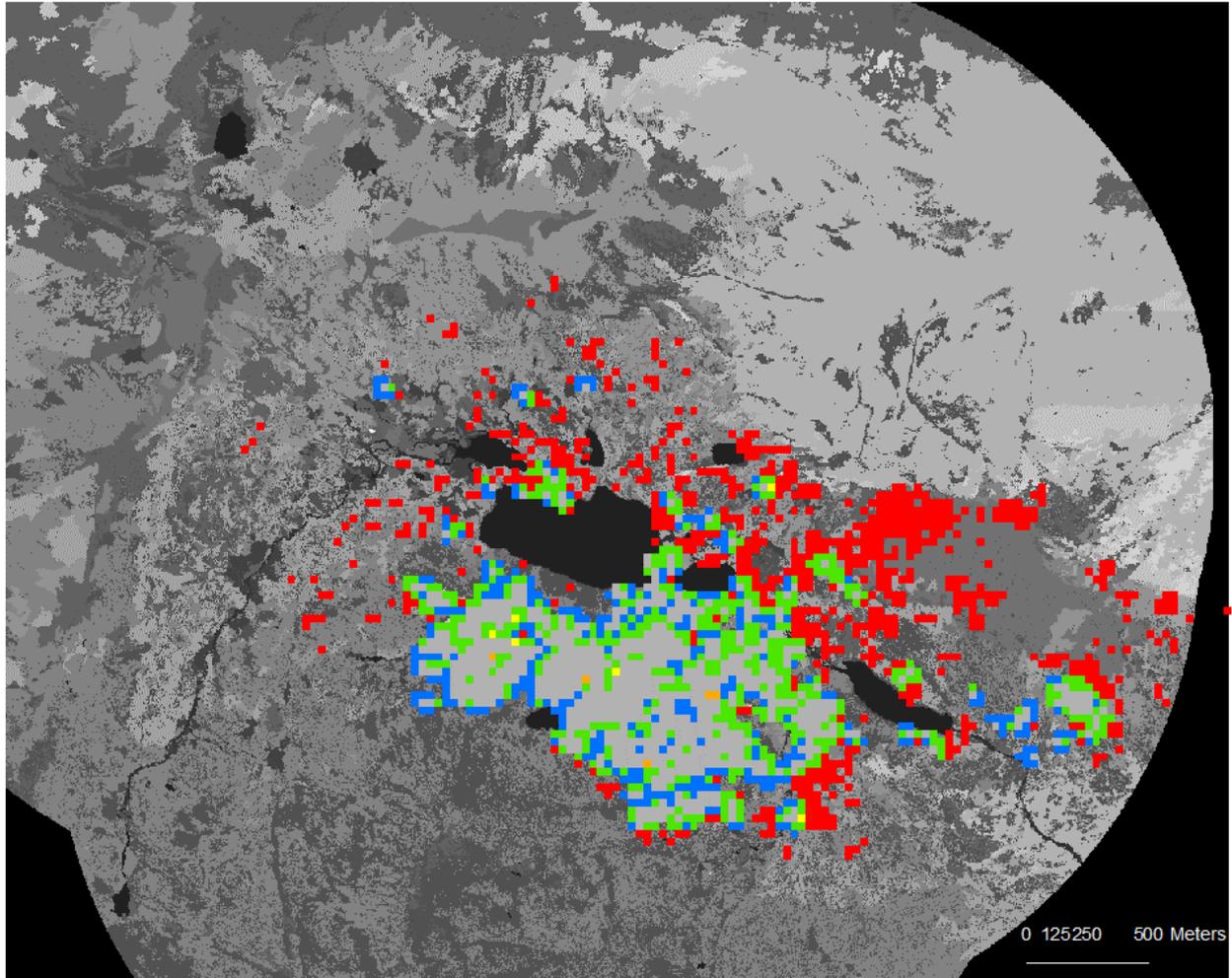
- Simulation avec une distance de dispersion courte



*Figure 35- Comparaison entre la carte réelle (à gauche) de dispersion des individus en 2008 et la carte de Simulation 5a (à droite)*

Ce calibrage du paramètre distance influence nettement l'organisation spatiale des diffusions. En effet, la dispersion des arbres sur de courtes distances entraîne une densification des zones déjà enforestées en 1993. La forêt donc plus compacte.

La cartographie des allocations spatiales corrobore cette analyse (figure 35).

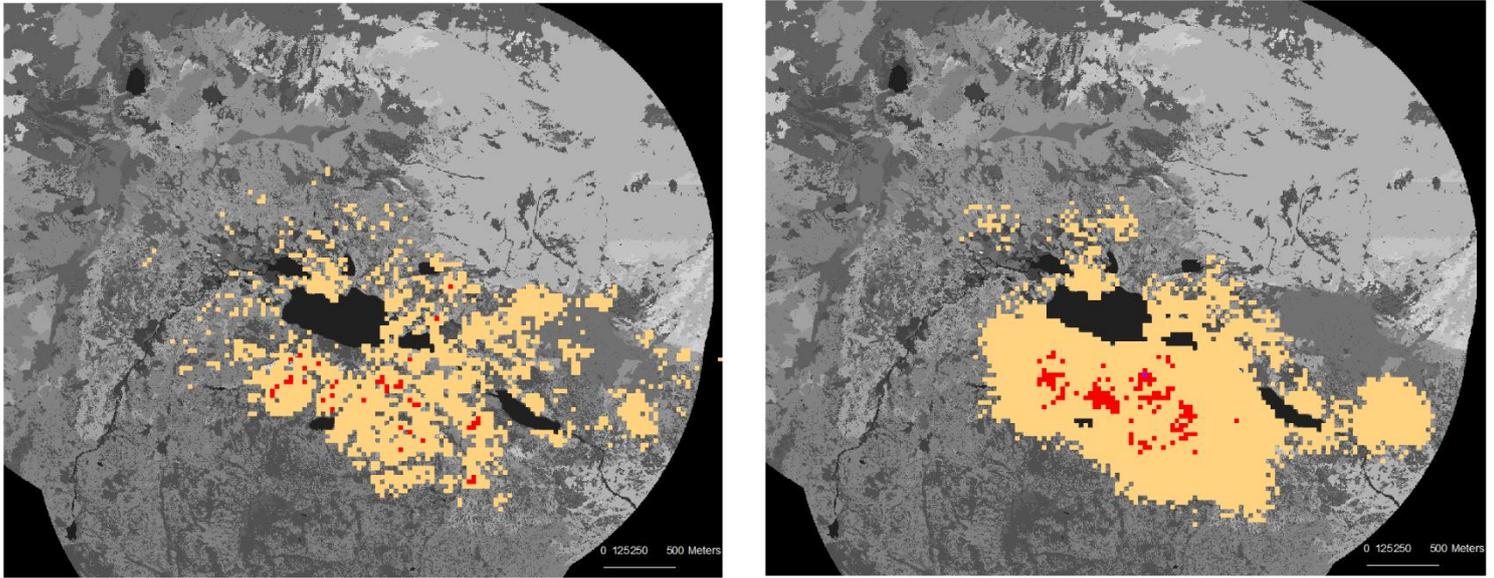


*Figure 35 - Carte des allocations spatiales issues de la Simulation 5a par rapport à la réalité*

On observe un très faible taux de zones détectées mais qui ne sont pas colonisées dans la réalité par rapport aux autres simulations. Les zones dont la densité d'arbres est surestimée par le modèle sont faibles. Ce phénomène est lié à l'importance de la mortalité des graines. En effet, la simulation sous-estime largement le nombre total d'arbres (9 244 pour 11 810 en réalité).

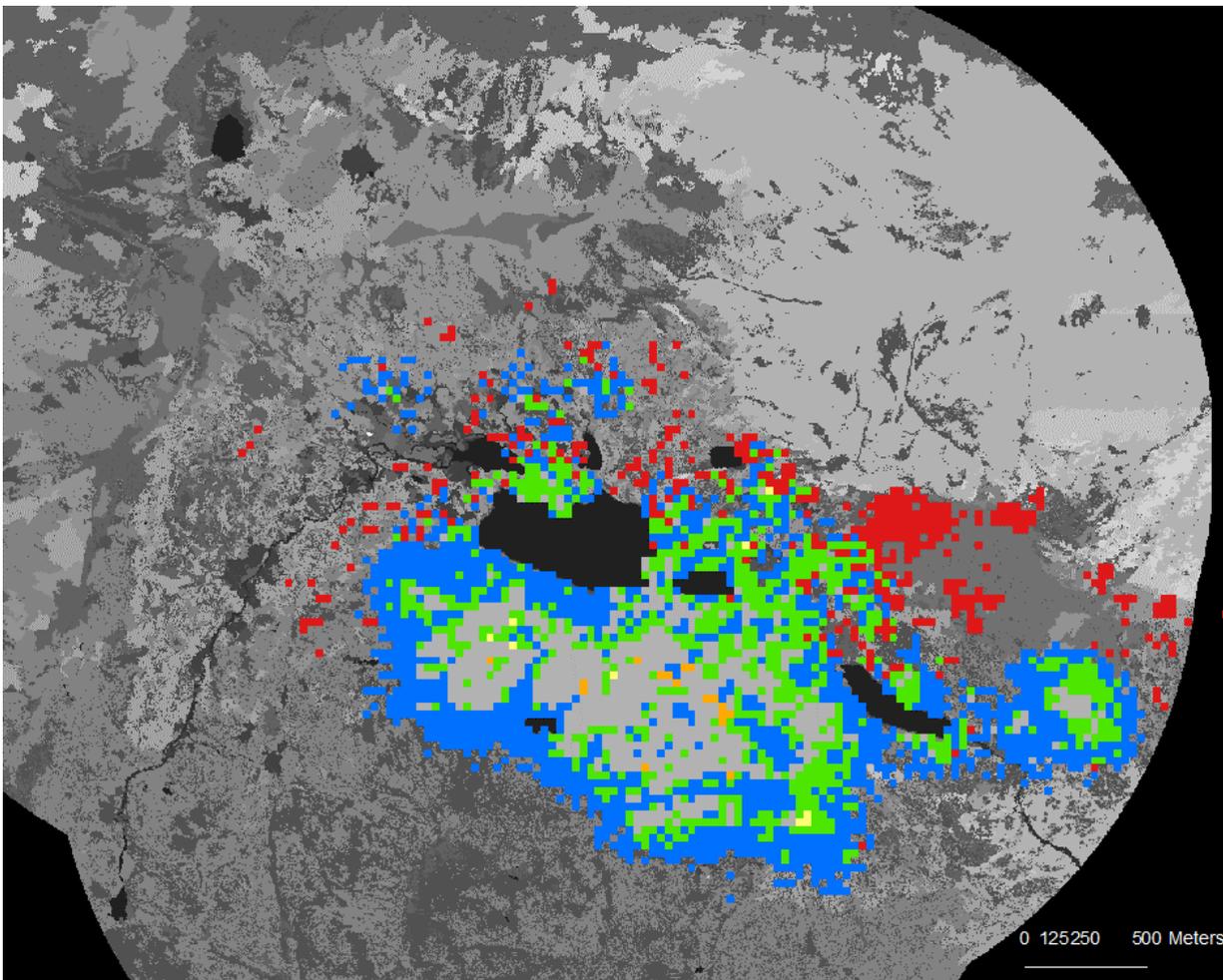
Le facteur *distance* a donc un impact fort sur l'organisation spatiale de la forêt.

- Simulation avec une distance de dispersion longue



*Figure 36 - Comparaison entre la carte réelle (à gauche) de dispersion des individus en 2008 et la carte de Simulation 5b (à droite)*

Cette simulation permet de corroborer les résultats précédents quant à la dispersion en tâche d'huile de la forêt simulée. Néanmoins, on constate que cette paramétrisation du modèle favorise la création d'arbres isolés aux alentours des zones forestières (figure 36). Le fait d'augmenter la distance de dispersion entraîne la diminution de l'impact des facteurs limitant et donc la hausse de la germination des graines. On dénombre 12 345 arbres simulés contre 11 810 en réalité.



*Figure 37 - Carte des allocations spatiales issues de la Simulation 5b par rapport à la réalité*

La carte de comparaison des allocations (figure 37) entre la simulation et la réalité montre que l'augmentation de la distance de dispersion à un impact sur la prise en compte des arbres éloignés de la forêt. Néanmoins, ce paramètre revu à la hausse pourrait avoir des conséquences sur la distribution spatiale de la forêt en inhibant les phénomènes de densification des zones forestières et de recolonisation de proche en proche.

### 3. Synthèse des indices de validité du modèle

La validité du modèle réside en deux points essentiels : l'identification des facteurs prépondérants dans le processus de recolonisation et la détection des dynamiques spatio-temporelles en jeu.

La synthèse des résultats obtenus pour chaque type de paramétrisation du modèle permet d'examiner le rôle de chaque facteur explicatif utilisé. La comparaison entre les allocations spatiales simulées et réelles est un indice de validité des paramètres, cet indice est illustré par le graphique de la figure 38.

Globalement, le modèle détecte bien la plupart des zones de recolonisation. Néanmoins les résultats du graphique corroborent ceux des cartes précédentes. La totalité des simulations prédit une évolution de la forêt en tâche d'huile.

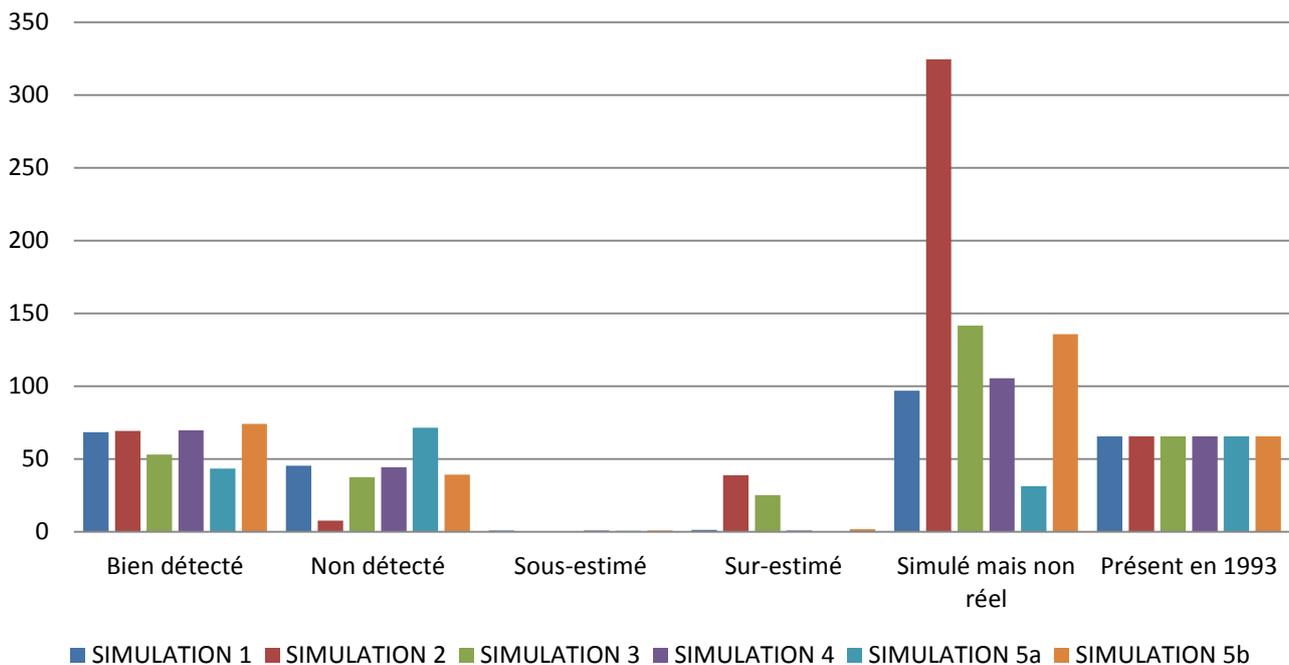


Figure 38 - Graphique présentant les allocations spatiales de chaque simulation en fonction de la réalité (en hectares)

En effet, au regard du tableau 6 qui détaille les superficies et les pourcentages de détection, le taux de zones bien détectées est correct pour la plupart des simulations. Une majeure partie des zones de recolonisation simulées par le modèle ne sont pas observées dans la réalité.

Tableau 6 - Allocations spatiales de chaque simulation en fonction de la réalité (en hectares)

	Simulation 1		Simulation 2		Simulation 3		Simulation 4		Simulation 5a		Simulation 5b	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Bien détecté	68.4	2.596	69.3	2.631	53.1	2.016	69.8	2.650	43.5	1.651	74.2	2.817
Non détecté	45.4	1.723	7.6	0.288	37.5	1.423	44.4	1.685	71.5	2.714	39.3	1.492
Sur-estimé	0.9	0.034	0.3	0.011	0.3	0.011	0.9	0.034	0.6	0.023	0.9	0.034
Sous-estimé	1.4	0.053	38.9	1.477	25.2	0.957	1	0.038	0.5	0.019	1.7	0.065
Simulé mais non réel	97	3.682	324.5	12.318	141.7	5.379	105.4	4.001	31.4	1.192	135.7	5.151
Présent en 1993	65.6	2.490	65.6	2.490	65.6	2.490	65.6	2.490	65.6	2.490	65.6	2.490
Fond	2355.7	89.421	2128.2	80.785	2311	87.724	2347.8	89.121	2421.3	91.911	2317	87.952
Total	2634.4	100	2634.4	100	2634.4	100	2634.4	100	2634.4	100	2634.4	100

Pour comprendre l'importance de chaque facteur dans le processus de recolonisation, il est possible de comparer les simulations de variation des paramètres (Simulations 2 à 5b) avec la Simulation 1 comprenant l'ensemble des facteurs. Une variation forte des superficies en fonction des types de détections implique donc l'importance de la prise en compte du facteur dans le modèle.

La comparaison des quantités de détection amène à penser que les *paramètres Production de graines en fonction de l'âge, Couvert végétal et Distance à l'arbre semencier* sont des facteurs jouant un rôle dans la production et dispersion des arbres au sein de modèle. Or, le facteur *Directions des vents* ne semble pas jouer un rôle important dans la dispersion des arbres simulés. Les taux de détection sont relativement les mêmes entre la Simulation 4 et la Simulation 1 et la comparaison des cartes (partie précédente) a permis de mettre en évidence les mêmes patterns spatiaux. Les effets invisibles de ce facteur peuvent être dus au développement en tâche d'huile simulé par le modèle.

Une comparaison selon deux classes de densité est ensuite réalisée (tableau 7). La classification est basée sur les densités suivantes pour une zone de 25m<sup>2</sup> :

- Un pixel comprenant 0.0001 à 2 arbres est une zone de recolonisation à forêt claire
- Un pixel comprenant 2 à 4 arbres est une zone de forêt claire à forêt dense

Dans la réalité, il n'existe pas de zones de forêt dense. La forêt réelle est donc une forêt éparse même au sein de l'ancienne pinède. Ce tableau met en évidence une surestimation de la superficie des zones de recolonisation et forêt par le modèle. Lorsque la forêt est sous-estimée (simulation5a), le modèle n'est pas calibré au niveau quantitatif, c'est-à-dire qu'il ne produit pas assez d'arbres. La simulation 1 est celle qui se rapproche le plus de réalité en terme de quantité d'arbres produits, or spatialement, la superficie de la forêt est surestimée. On peut penser que pour se rapprocher de la réalité, le modèle doit densifier certaines zones pour limiter la superficie de la forêt tout en gardant une quantité d'arbres réelle.

*Tableau 7 - Comparaison des densités et du nombre d'arbres en fonction des simulations et de la réalité*

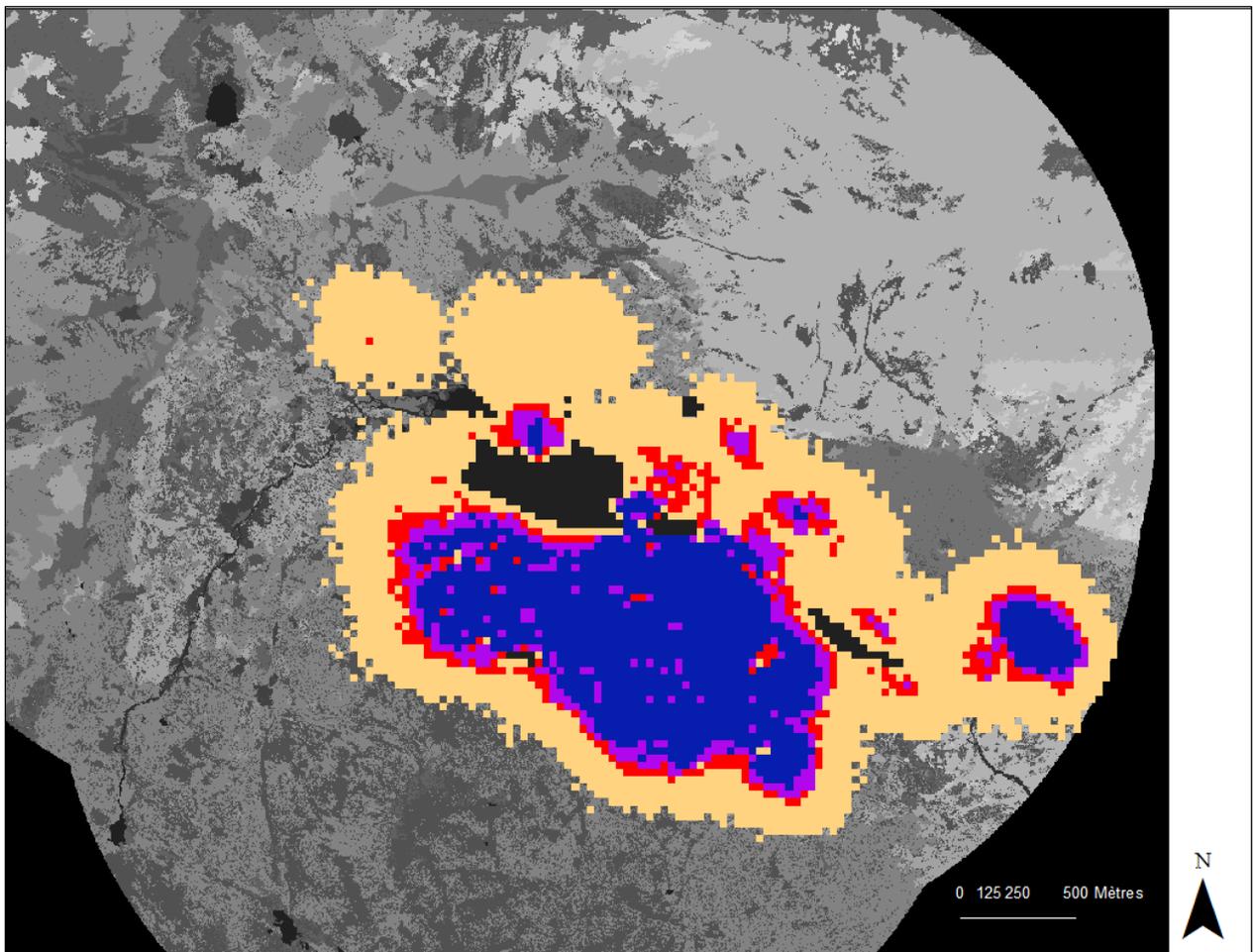
	Surfaces (en ha)		Nombres d'arbres
	Recolonisation à forêt claire	Forêt claire à dense	
Simulation 1	231.9	/	11 760
Simulation 2	476.8	18.9	73 435
Simulation 3	219.2	65.2	109 621
Simulation 4	241.3	/	11 660
Simulation 5a	140.9	/	9 244
Simulation 5b	276.5	/	12 345
Réalité de 2008	171.4	/	11 810
Réalité de 1993	65.3	/	2 813*

L'ensemble du calibrage du modèle permet donc d'identifier les atouts et les inconvénients de la paramétrisation du modèle. L'atout principal de cette modélisation réside dans sa capacité à produire un nombre d'arbres très proche de réalité. Le modèle est moins précis sur les allocations spatiales de la forêt. Cette caractéristique représente un inconvénient puisqu'elle montre l'incapacité du modèle à expliquer la dynamique spatiale de la forêt. Néanmoins, ce défaut est une force pour la compréhension de l'évolution de la forêt. Et de

nouveaux tests peuvent alors être mis en place pour s'approcher de la réalité et simulée le peuplement de 2050 dans la tendance de 2008.

### C. Simulation d'un scénario prospectif

A défaut d'avoir pu réaliser des scénarios contrastés de l'évolution de la forêt de Pin à crochets, un scénario tendanciel a été construit sur la base de la Simulation 1. Cette dernière ne représente pas correctement les dynamiques spatiales de la forêt en 2008, mais elle met en évidence un nombre d'arbres qui se rapproche de la réalité. D'autres simulations ont été réalisées en faisant varier les paramètres pour se rapprocher de la réalité. Or, la création de ces simulations demande beaucoup de temps, qui a manqué pour trouver la meilleure simulation de la forêt de 2008. Néanmoins, la Simulation 1 propose les zones potentielles de changement. Le scénario, illustré par la carte de la figure 39, met en évidence les zones potentielles d'enforestement pour 2050.

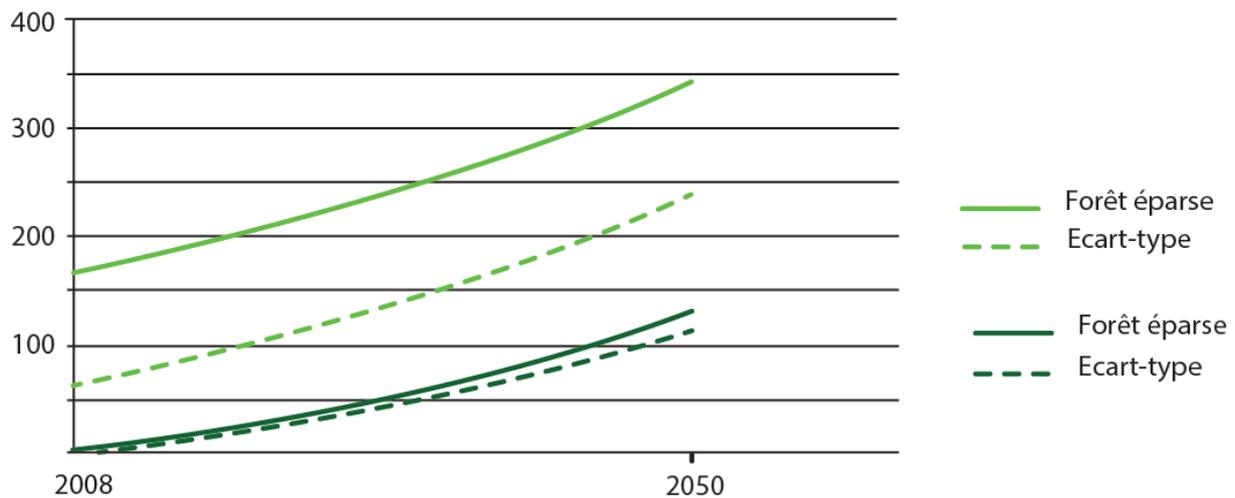


*Figure 39 - Carte du scénario tendanciel de la forêt de Pin à crochets dans la vallée de Bassiès*

Comme observé pour la simulation 1, le scénario tendanciel met en évidence un développement de la forêt en tâche d'huile. Ceci signifie une forte densification des zones déjà colonisées en 1993 et une expansion en cercle de densité concentrique autour des zones denses.

La forêt colonise, ainsi, l'ensemble du versant Nord de la vallée avec le développement d'une forêt dense. Le peuplement colonise de proche en proche l'ensemble du fond de vallée pour envahir le versant Sud de la vallée. Seulement deux zones ne sont recolonisées, le fond du cirque, d'où la rivière arrive dans la vallée, et le Pic du Far. Sur la carte réelle de 2008, on observe que le Pic est déjà pris d'assaut par la forêt, que le fond de vallée commence à être colonisé par des pins isolés.

Le graphique de la figure 40 présente l'évolution des surfaces potentiellement enforestées en 2050.



*Figure 40 – Evolution potentielle de forêt de Pin à crochet dans la vallée de Bassiès(en hectares)*

Le scénario tendanciel prédit une augmentation des zones de forêt éparses, plus précisément une multiplication par deux des surfaces de forêt éparses. Le scénario prédit aussi la densification de la forêt. En 2008, il n'existe pas de zones de forêt dense, or en 2050, le modèle simule près de 120 hectares de forêt dense.

Les écart-types représentent les surfaces détectées pour une seule simulation sur les 25 réalisées pour produire le scénario. Les différences entre les courbes sont importantes et le phénomène sera expliqué dans la partie suivante de discussion.

## IV. Discussion

L'ensemble de la démarche mise en place dans ce travail pour envisager la forme du futur peuplement a permis de caractériser la forêt de Pin à crochets de la vallée de Bassiès et mettre en lumière les composantes et particularismes de ce système. L'ensemble de l'analyse amène, finalement, à évaluer les perspectives de ce travail liées aux limites rencontrées et aux résultats trouvés.

L'analyse des données empiriques permet d'appréhender l'évolution passée de la forêt. Dans les années 1970, le peuplement de Pin à crochets de Bassiès est une forêt éparse accrochée sur le versant Nord de la vallée, entre 1600 et 1800m d'altitude, sur des pentes pouvant dépasser 30°. D'après la littérature, la situation du peuplement est liée à la pratique de l'agro-pastoralisme avant les années 1950 dans le fond de vallée qui a inhibé le développement du pin. Entre 1976 et 1993, une augmentation des pins isolés est observée en dessous de la forêt existante. C'est entre 1993 et 2008, qu'une explosion du nombre de pins isolés est enregistrée dans l'ensemble de la vallée. La densité de la forêt sur le versant Nord croît et les pins isolés se répartissent dans le fond de vallée et atteignent les pentes du versant Sud et prennent d'assaut le Pic du Far. Entre 2008 et 2013, le laps de temps ne permet pas de considérer de grands changements, néanmoins, on observe l'apparition de pins isolés vers le fond du cirque. Le développement de la forêt est donc visible et semble se créer selon un processus de recolonisation proche des patches de forêt existants et par le biais de pins isolés.

La production d'un modèle d'évolution de la forêt a permis de mettre en évidence l'importance des facteurs explicatifs du développement de cette forêt. Les résultats de la paramétrisation du modèle corroborent l'identification des paramètres explicatifs dans la littérature. En effet, la production de graines en fonction de l'âge, la distance à l'arbre semencier, l'occupation du sol et l'altitude semblent être des paramètres essentiels dans le processus de recolonisation. Seule la direction du vent n'est pas apparue comme structurante dans les dynamiques spatiales. Néanmoins, ce phénomène peut être expliqué par un biais dans la démarche méthodologique adoptée.

La programmation du modèle a nécessité l'utilisation de variables aléatoires liées à des probabilités. Cette exigence implique un degré de liberté laissé au hasard qui doit être intégré dans la démarche de création des cartes simulées. Pour cela, le choix a été fait de réaliser 25 runs par tests de paramétrage ou pour la création du scénario, et faire une moyenne par maille de 1000m<sup>2</sup> du nombre d'arbres par simulations. Or, ce choix entraîne un impact fort dans le nombre de mailles enforestées. Lorsqu'on fait la moyenne par maille de l'ensemble des simulations, on crée une densité moyenne dans la maille qui représente un potentiel d'enforestation. La carte finale créée à partir de la moyenne comprend donc une augmentation de la superficie de la forêt simulée par rapport un seul run, comme illustré par la figure 41.

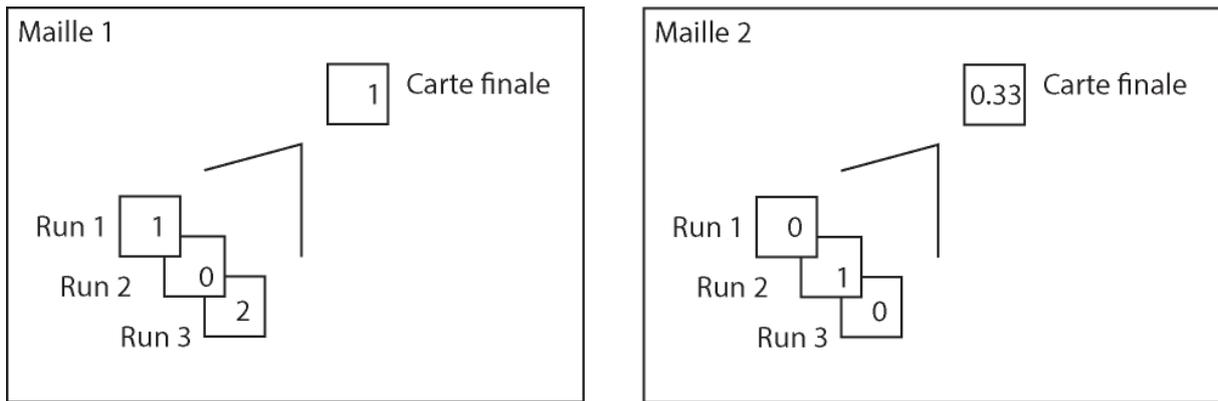


Figure 41 – Illustration du biais engendré par la pondération du nombre d'arbres par maille

Le modèle est programmé pour produire un certain nombre d'arbres. Si dans un run, un arbre est créé dans une maille, ce même arbre ne sera pas ailleurs, inversement, s'il n'est pas créé dans cette maille il le sera ailleurs. Ce choix méthodologique a largement influé sur les cartes produites. En effet, la figure suivante (figure 42) illustre la différence spatiale entre la création d'une carte issue d'un seul run d'une simulation et celle issue de la moyenne des runs de la simulation.

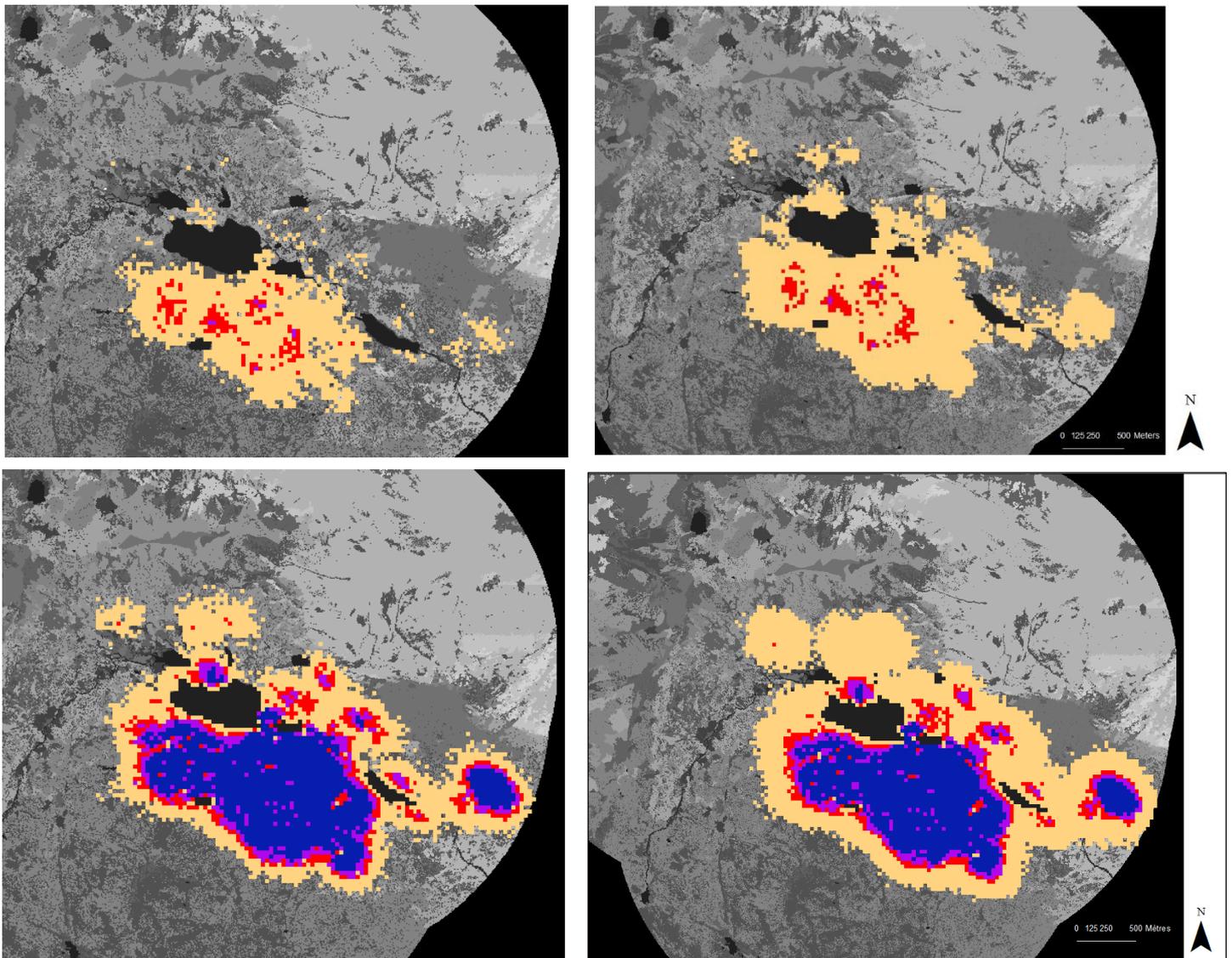


Figure 42 – Impact de la pondération du nombre d'arbres par maille sur les dynamiques spatiales simulées pour la Simulation 1 (en haut) et pour le scénario tendanciel(en bas)

Ainsi, les cartes produites sont des cartes de potentiel, proposant les zones plus ou moins favorables à l'implantation des pins. Ces zones se situent donc dans un rayon de 130mètres autour des arbres existants en 1993. Le développement en tâche d'huile révélé par les cartes de simulation est dû, en partie, à ce biais technique et entraîne la dissimulation des effets de la direction du vent dans le processus de recolonisation.

Néanmoins, la paramétrisation du modèle tend à effacer le processus de recolonisation par les pins isolés. Le calibrage du modèle a mis en lumière la nécessité de revoir la paramétrisation des facteurs. En effet, le modèle ne simule pas l'implantation de pins isolés des patches de forêts existants. Ainsi, des zones, telles que la partie Ouest de la vallée et le Pic du Far, ne sont pas détectées comme zones potentielles de recolonisation, or elles le sont déjà en 2008.

Le scénario tendanciel, créé à partir du paramétrage remis en question, propose une expansion de la forêt de proche en proche et une densification des zones de forêt de 1993. Il ne faut pas perdre d'esprit que la carte d'occupation du sol n'est pas dynamique. Ceci implique des erreurs dans les probabilités de germination en fonction du couvert végétal et donc gommer des dynamiques possibles.

Le temps manque pour créer de nouvelles simulations, mais des propositions sont faites :

- Augmenter la distance de dispersion des graines. La distance maximale à l'arbre le plus proche observée grâce aux données de télédétection est de 753mètres. Il serait intéressant de réaliser des probabilités de distance à l'arbre semencier. La méthode serait la même que celle utilisée pour la direction des vents. Par exemple, entre 0 et 130m de l'arbre la probabilité d'atterrissement de la graine est de 50% de chance, entre 130m et 300m la probabilité est de 30% et entre 300m et 700m la probabilité est de 20%.
- Forcer certaines probabilités d'occupation. En effet, la recolonisation réelles se fait moins sur les zones minérales et de tourbières que dans les simulations. Nous proposons de réduire ces probabilités en attribuant la différence à l'occupation du sol de type conifères et pelouses chlorophylliennes.
- Ajuster le coefficient de mortalité pour avoir en totalité environ 11 810 arbres simulés en 2008.

Cette paramétrisation pourrait renforcer le modèle en ajustant la dynamique spatiale de recolonisation liée aux pins isolés.

## CONCLUSION

Les forêts subalpines sont des milieux en profondes mutations dues à l'abandon des pratiques agro-pastorales et au développement de nouvelles activités. Ce sont des systèmes complexes comprenant une multitude de composantes à la fois naturelles et anthropiques. Il convient alors de développer une gestion intégrée des changements en cours et à venir. La modélisation prospective présente une démarche systémique permettant d'appréhender les facteurs explicatifs du système étudié pour développer des scénarios des futurs souhaitables ou inacceptables. Un modèle permet la création d'outils opérationnels de gestion.

Cette étude s'est attachée à modéliser les dynamiques spatio-temporelles de la forêt de Pin à crochets dans la vallée de Bassiès. Le site d'étude est marqué par l'abandon des pratiques agro-pastorales à partir du milieu du XXe siècle, entraînant un processus de recolonisation de la vallée par le Pin à crochets. L'objectif de la modélisation est de comprendre les dynamiques spatio-temporelles passées pour envisager la forme de la forêt en 2050.

L'approche du modèle est individu-centrée. On considère que les comportements individuels des arbres structurent le système global de la forêt et que l'espace influence les dynamiques par ses caractéristiques. L'étude des dynamiques passée constitue une étape fondamentale du travail pour appréhender les changements futurs. Les données empiriques et statistiques ont permis de constater que la dynamique de recolonisation part de l'ancien peuplement situé sur le versant Nord de la vallée, pour descendre dans le fond de vallée à partir des années 1990 et enfin remontée sur le versant Sud dans les années 2000. En 2013, l'apparition de pins sur le versant Est du cirque de Bassiès révèle la recolonisation du fond du cirque par la forêt.

L'identification des paramètres en jeu dans ce processus de recolonisation a révélé cinq facteurs structurants et modélisables : l'âge des arbres, le nombre de graines produites, la distance à l'arbre semencier, la direction du vent et la mortalité des graines en fonction du couvert végétal, de l'altitude et d'autres causes prises en compte mais non identifiées.

La phase de validation du modèle montre que le modèle est bien calibré sur le plan quantitatif (la production d'arbres) mais moins sur le plan spatial pour deux raisons. (1) Le modèle, basé sur l'utilisation de variables aléatoires, permet de créer une carte des zones potentielles de recolonisation, ainsi, le nombre d'hectares colonisés ne correspondent pas à la réalité mais à l'ensemble des zones éventuelles d'enforestement. (2) La dynamique spatiale révélée par le modèle correspond à une recolonisation de proche en proche, or dans la réalité ce pattern est présent mais une autre dynamique coexiste, basée sur l'expansion de la forêt par les pins isolés.

Le scénario tendanciel développé dans ce travail expose donc une expansion de la forêt en tâche d'huile autour des patchs existants et une densification considérable des zones déjà recolonisées.

L'ensemble des analyses permettent de proposer une nouvelle paramétrisation du modèle, explicitée dans la partie discussion, pour mieux appréhender les dynamiques spatiales observées. Certaines données et le temps ont manqué à cette étude pour développer des scénarios contrastés fondé sur la réintroduction du pastoralisme ou les conséquences du changement climatique. Ce modèle mérite alors d'être couplé avec d'autres modélisations telles que l'évolution des usages et occupations des sols.

## BIBLIOGRAPHIE

Alvarez-Uria P. et Korner C., 2007, *Low Temperature Limits of Root Growth in Deciduous and Evergreen Temperate Tree Species*, *Functional Ecology* 21 (2): 211–18. ⑦

Ameztegui A. et al, 2010, *Land-use changes as major drivers of mountain pine (Pinus uncinata Ram.) expansion in the Pyrenees*, *Global Ecology and Biogeography* 19 : 632–641. ①

Basse R. M., 2010, *La LGV PACA dans l'évolution du système territorial transfrontalier franco-italo-monégasque*, Thèse de doctorat d'université, Université de Nice-Sophia Antipolis, 295p.

Benecke U. et Gobl F., 1974, *The influence of different mycorrhizae on growth nutrition and gazexchange of Pinus mugo seedlings*, *Plant and soil* 40 : 21 – 32. ②

Beslon G., 2008, *Modélisation individu-centrée de systèmes biologiques complexes*, Habilitation à diriger des recherches, Informatique et Information pour la Société (EDIIS), 138p.

Bosch O. et al, 1992, *Disturbance, age and size structure in stands of Pinus uncinata Ram*, *Pirineos*, Vol 140 : 5 – 14. ③

Bou Kheir et al, 2001, *Apport de la télédétection pour la modélisation de l'érosion hydrique des sols dans la région côtière du Liban*, *Télédétection*, Vol 2, n°2, p. 79-90

Caloz R. et Collet C., 2001, *Précis de télédétection*. Montréal: P.U.Q.

Camarero J. J. et Gutierrez E., 2002, *Plant Species Distribution across Two Contrasting Treeline Ecotones in the Spanish Pyrenees*, *Plant Ecology*, 162 : 247–257. ⑨

Camarero J. J. et al, 2006, *Spatial patterns of plant richness across treeline ecotones in the Pyrenees reveal different locations for richness and tree cover boundaries*, *Global Ecology and Biogeography*, 15 : 182–191. ⑥

Camarero J. J. et Gutierrez E., 2007, *Response of Pinus uncinata Recruitment to Climate Warming and Changes in Grazing Pressure in an Isolated Population of the Iberian System (NE Spain)*, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 39 (2) : 210-217. ⑩

Cantegrel (coord.), Office National des Forêts (ONF), 2014, *Evaluation patrimoniale des populations autochtones de Pin a crochets (Pinus uncinata Ramond) aux Pyrenees*, Collection dossiers forestiers, n° 25. ISBN : 978-2-84207-376-3

Delamarre A. et Malhomme M.-C., 2002, *Le prospective territoriale*. Paris: La Documentation française.

Elfouhaily Tanos M., 1996, *Modèle couplé vent/vague et son application à la télédétection par micro-onde de la surface de la Terre*, Thèse de doctorat d'université, Université de Paris 07, 232p.

Emsellem K. et al., 2012, *La géoprospective : l'émergence d'un nouveau champ de recherche?*. L'Espace géographique, Tome 41, p. 154-168.

Etienne M. et Le Page C., 2002, *Modéliser les dynamiques paysagères pour accompagner un projet d'aménagement du territoire : le cas du Causse Méjean*, Colloque : Gérer les paysages de montagne pour un développement concerté et durable, 15p.

Godet M., 1986, *Introduction to La Prospective*, Futures 18, n° 2, 134-57.

Godet M. et Durance P., 2011, *La prospective stratégique pour les entreprises et les territoires*. Paris: Dunod.

Haunold S., 2014, *Dynamiques de végétation dans la réserve naturelle du Néouvielle (Hautes-Pyrénées) entre 1951 et 2008 : Focus sur le Pin à crochets*, Rapport de stage Master 2, Université Toulouse III Paul Sabatier, 53p.

Hörsch B., 2003, *Modelling the spatial distribution of montane and subalpine forests in the central Alps using digital elevation models*, Ecological Modelling, Landscape Theory and Landscape Modelling, 168, n° 3

Houet T., sous presse, *Usages des modèles spatiaux pour la prospective*, 21p.

Morant P., 1999, *Contribution à la télédétection pour l'analyse et la cartographie du paysage bocager armoricain*, Ingénieries-EAT, 18, p. 61-71

Perrier A. et J., 2014 *Guide des arbres et arbustes de France*. [Bordeaux]: Sud ouest.

Picard G., 2002, *Modélisation radar des couverts végétaux, Application à la télédétection de couverts forestiers et agricoles*, Thèse de doctorat d'université, Université de Paul Sabatier Toulouse III, 204p.

Riou-Nivert P., 2005, *Les résineux: Écologie et pathologie*. Forêt privée française.

Riou-Nivert P., 2001, *Les résineux. Tome I*. Forêt privée française.

Sagnard F. et al, 2007, *Modelling Seed Dispersal to Predict Seedling Recruitment: Recolonization Dynamics in a Plantation Forest*, Ecological Modelling 203, n° 3-4

Sanders L., 1989, *L'analyse des données appliquée à la géographie*. Montpellier, G.I.P RECLUS, 268 p.

Scheller R. M. et al., 2007, *Design, development, and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolution*. Ecological Modelling 201, 409-419

Tappeiner U. et al, 1998, *Modelling vegetation patterns using natural and anthropogenic influence factors : preliminary experience with a GIS based model applied to an Alpine area*, Ecological Modelling, 113

Voiron-Canicio C., 2006, *L'espace dans la modélisation des interactions nature-société*, Colloque Interactions Nature-Société, analyse et modèles, La Baule, 6p.

Viglas J.N. et al., 2013, *Age and size effects on seed productivity of northern black spruce*. Canadian Journal of Forest Research 43, 534–543.

Waddle, J., 2013, *Analyse des dynamiques spatio-temporelles du pin à crochets (pinus uncinata) dans la vallée de Bassiès (Ariège)*. Rapport de stage Master 2, Université de Toulouse le Mirail, 94p.

Wallentin G. et al, 2008, *Understanding alpine tree line dynamics: An individual-based model*. Ecological Modelling 218, 235–246.

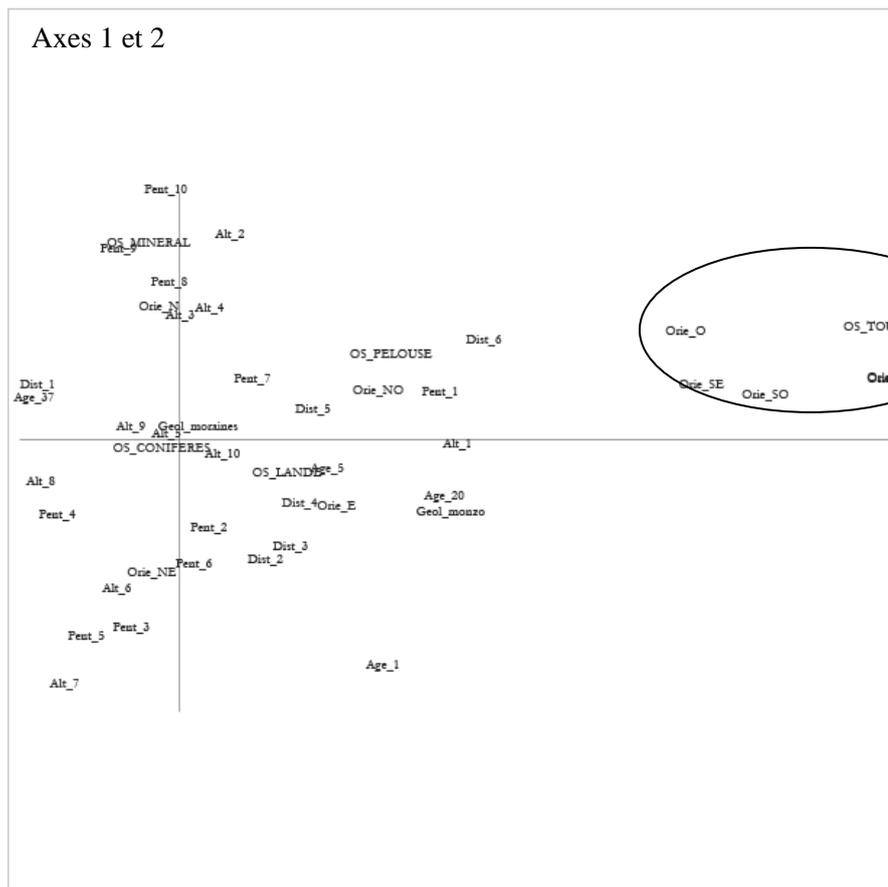
Camarero J. J. et Gutierrez E., 1999, *Structure and recent recruitment at alpine forest-pasture ecotones in the Spanish Central Pyrenees*, Ecoscience 6 (3) : 451 - 464. ⑤

# ANNEXES

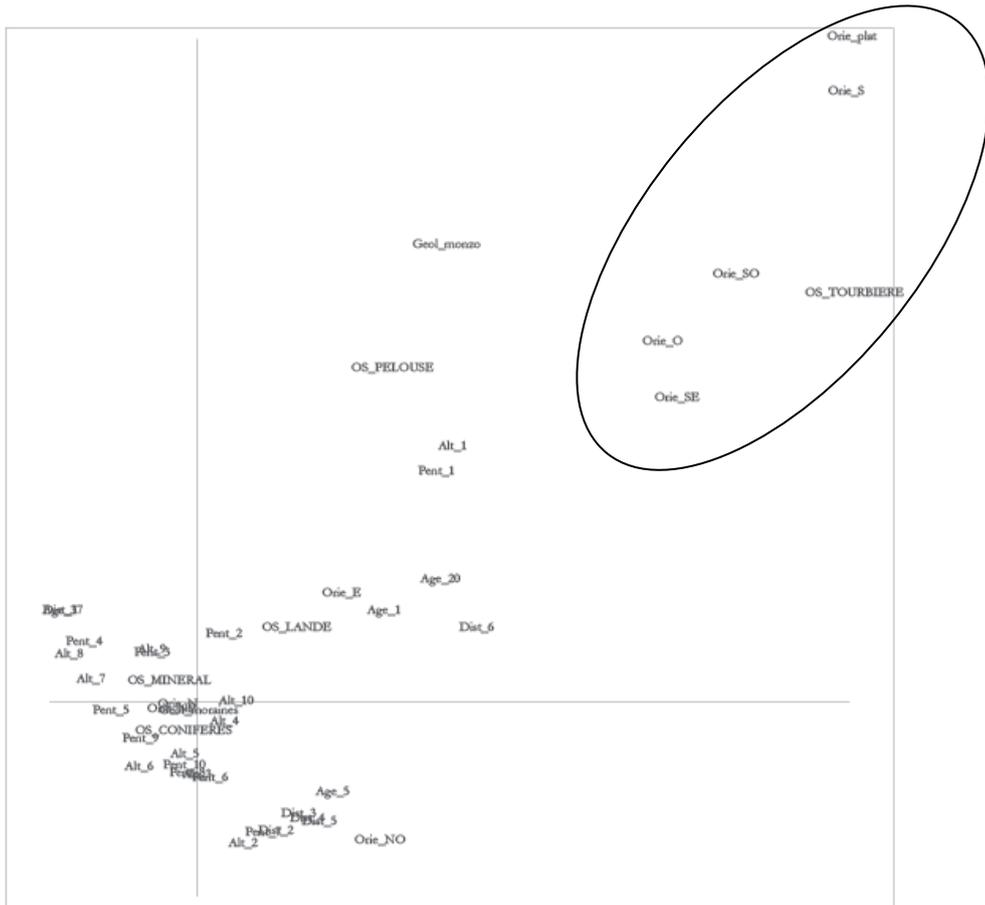
## ANNEXE 1 : Les analyses factorielles

Légende : les cercles noirs mettent en évidence les modalités retirées

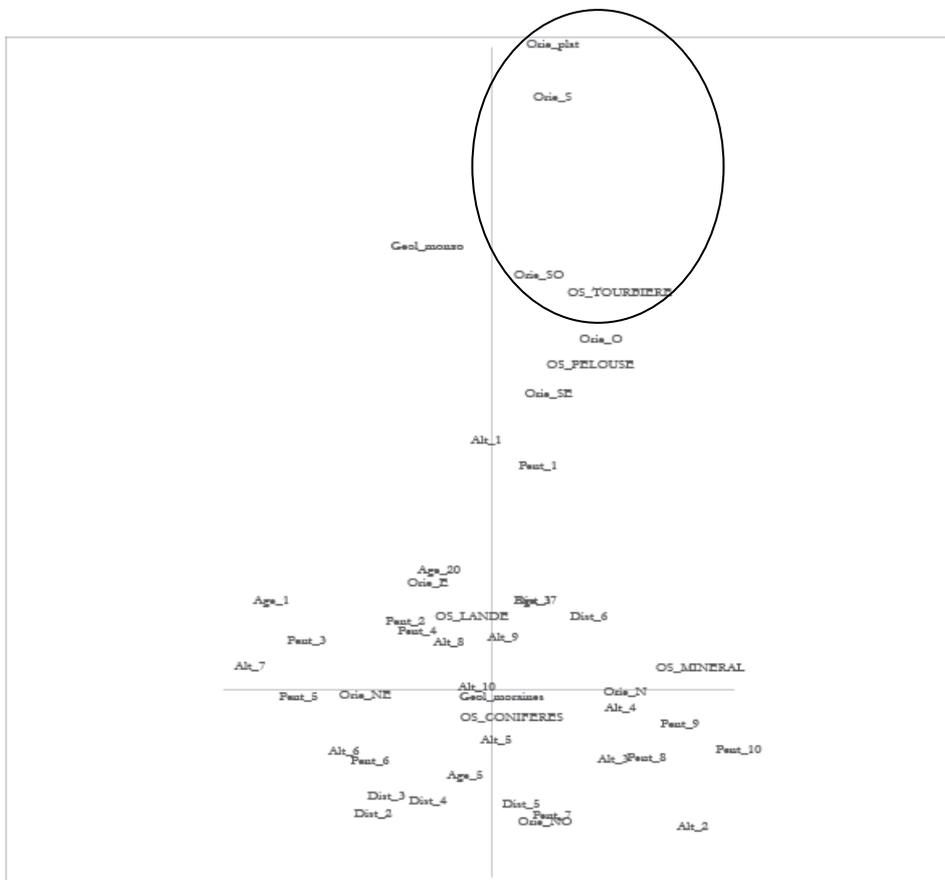
### AFC 1



Axes 1 et 3



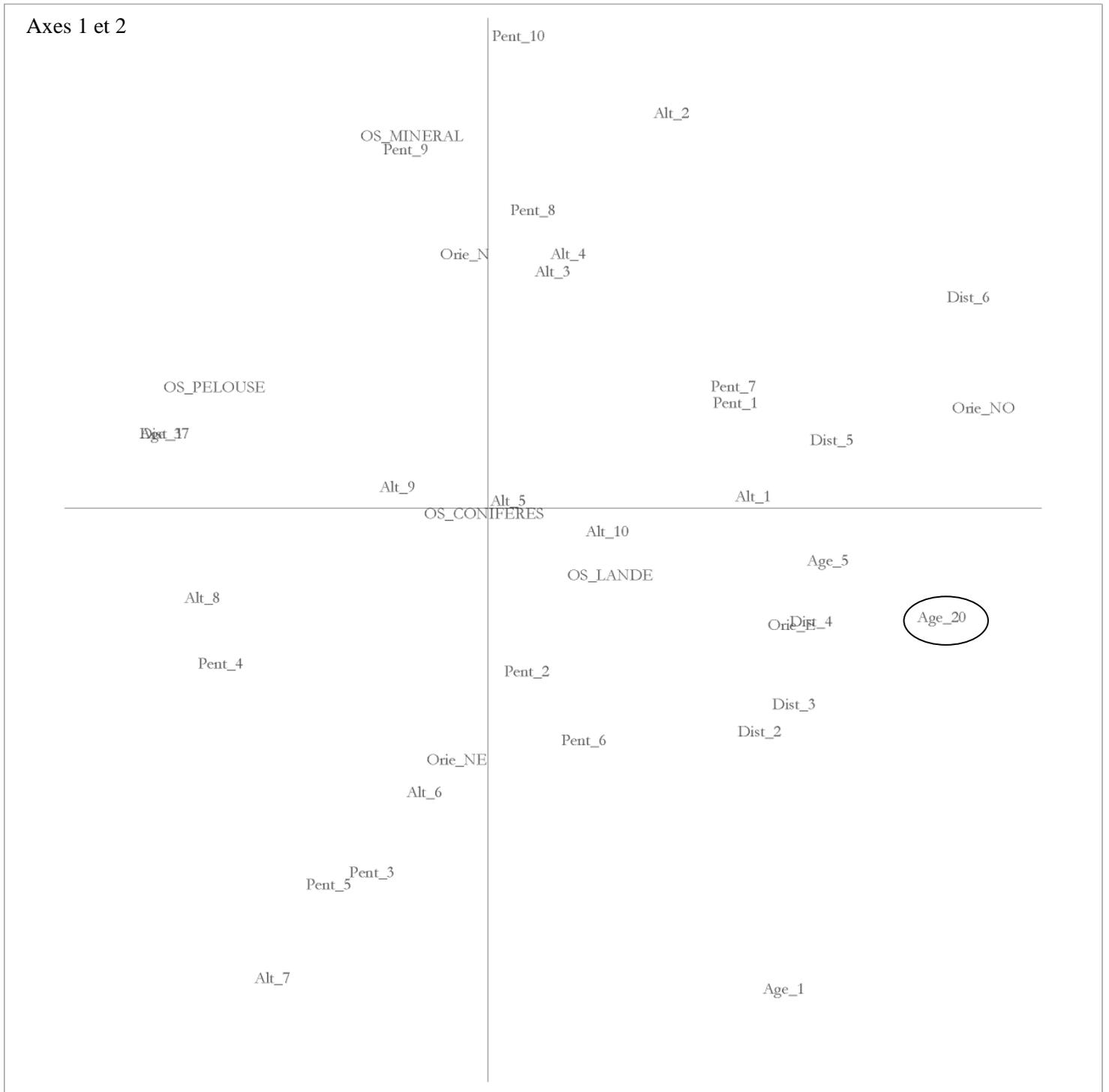
Axes 2 et 3



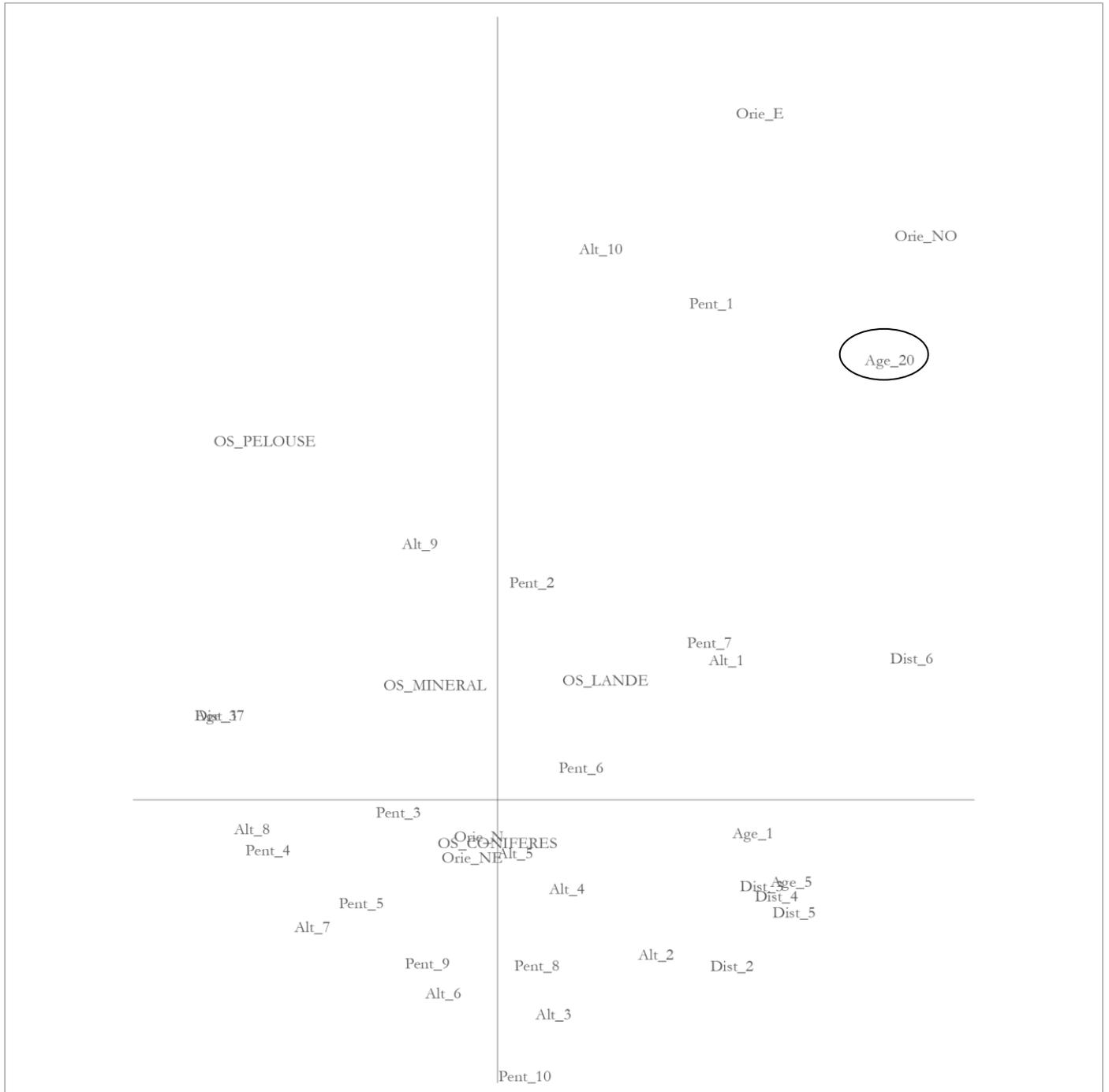




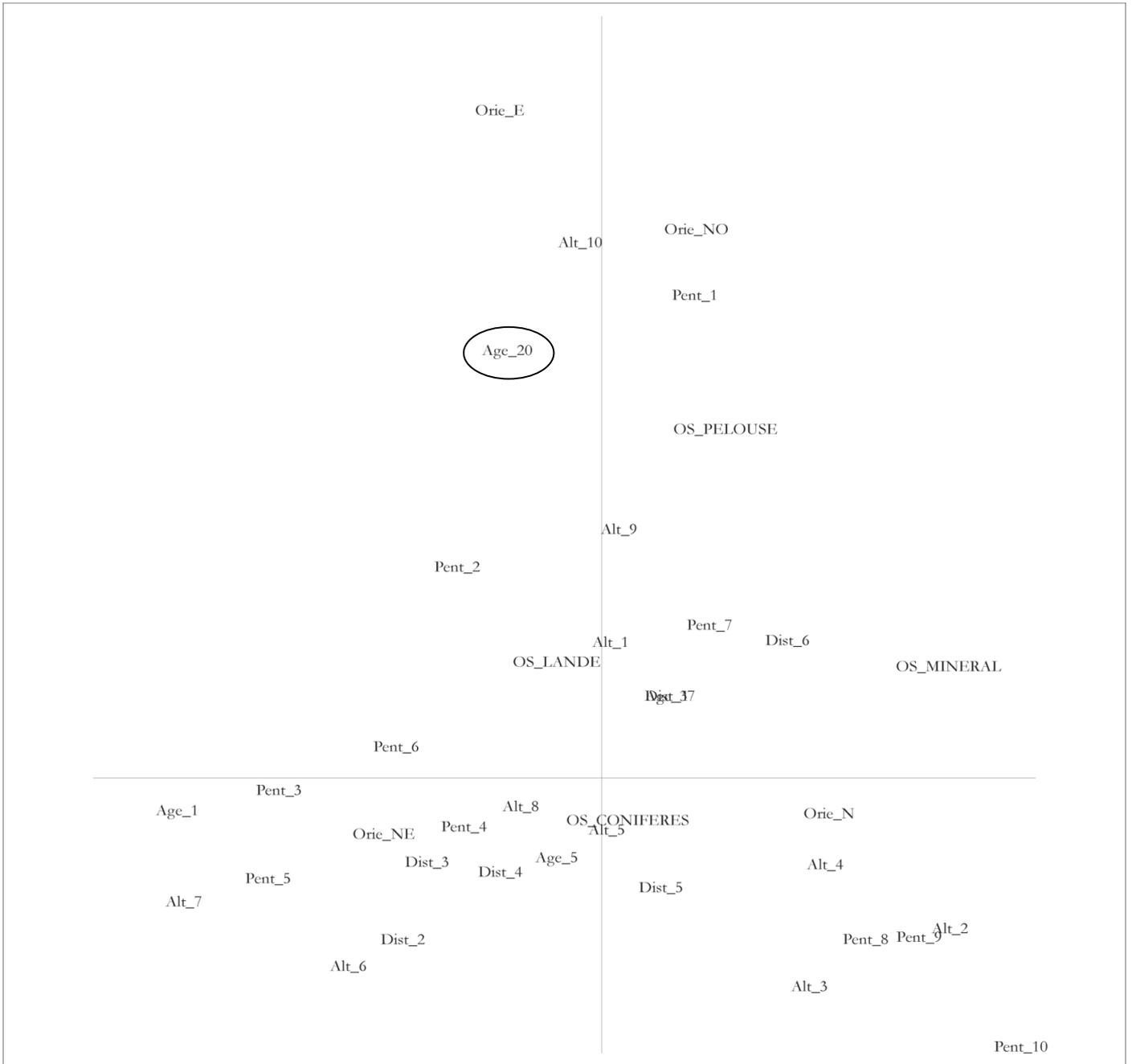
AFC 3



Axes 1 et 3

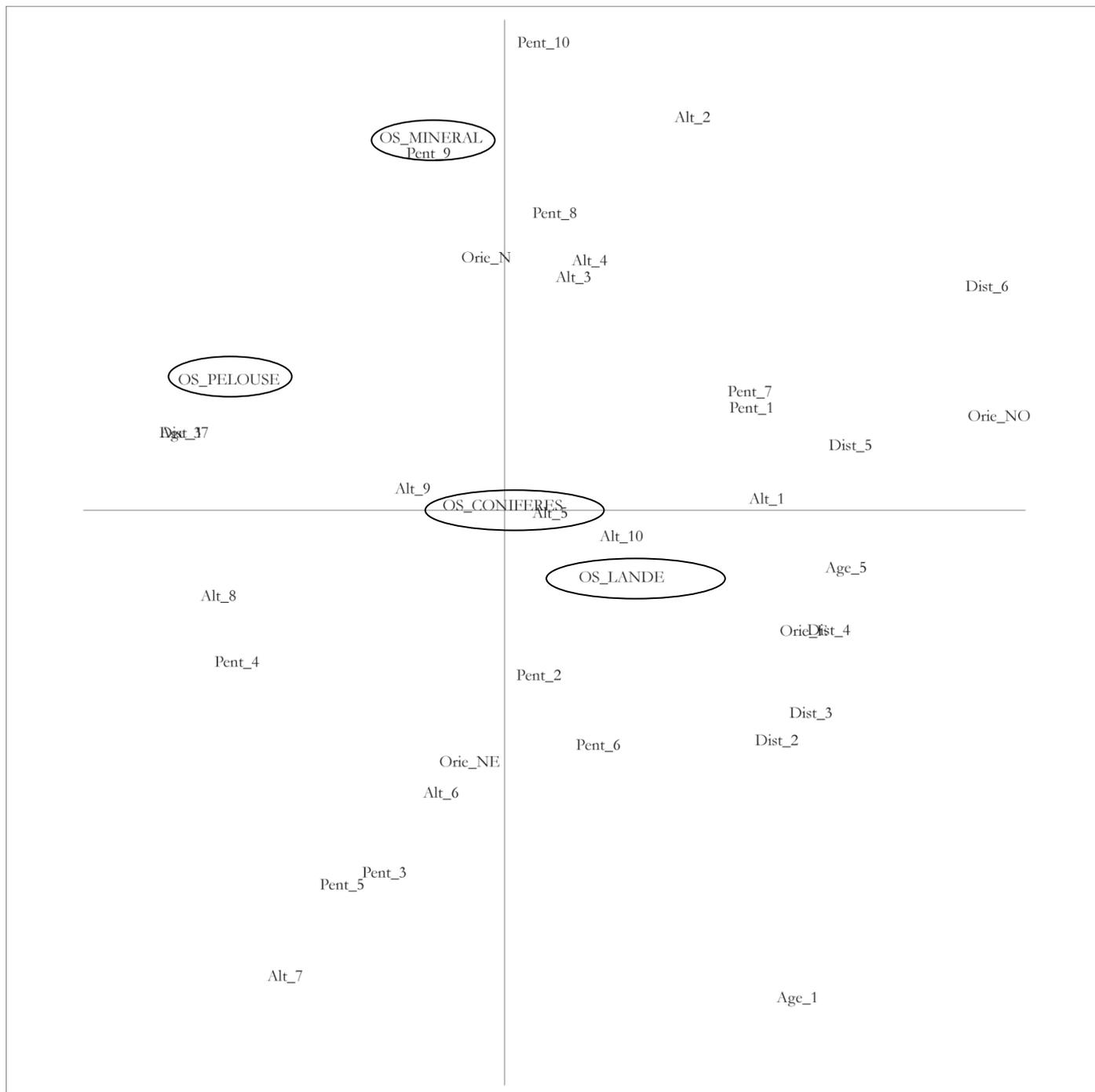


Axes 2 et 3



AFC 4

Axes 1 et 2



Axes 1 et 3

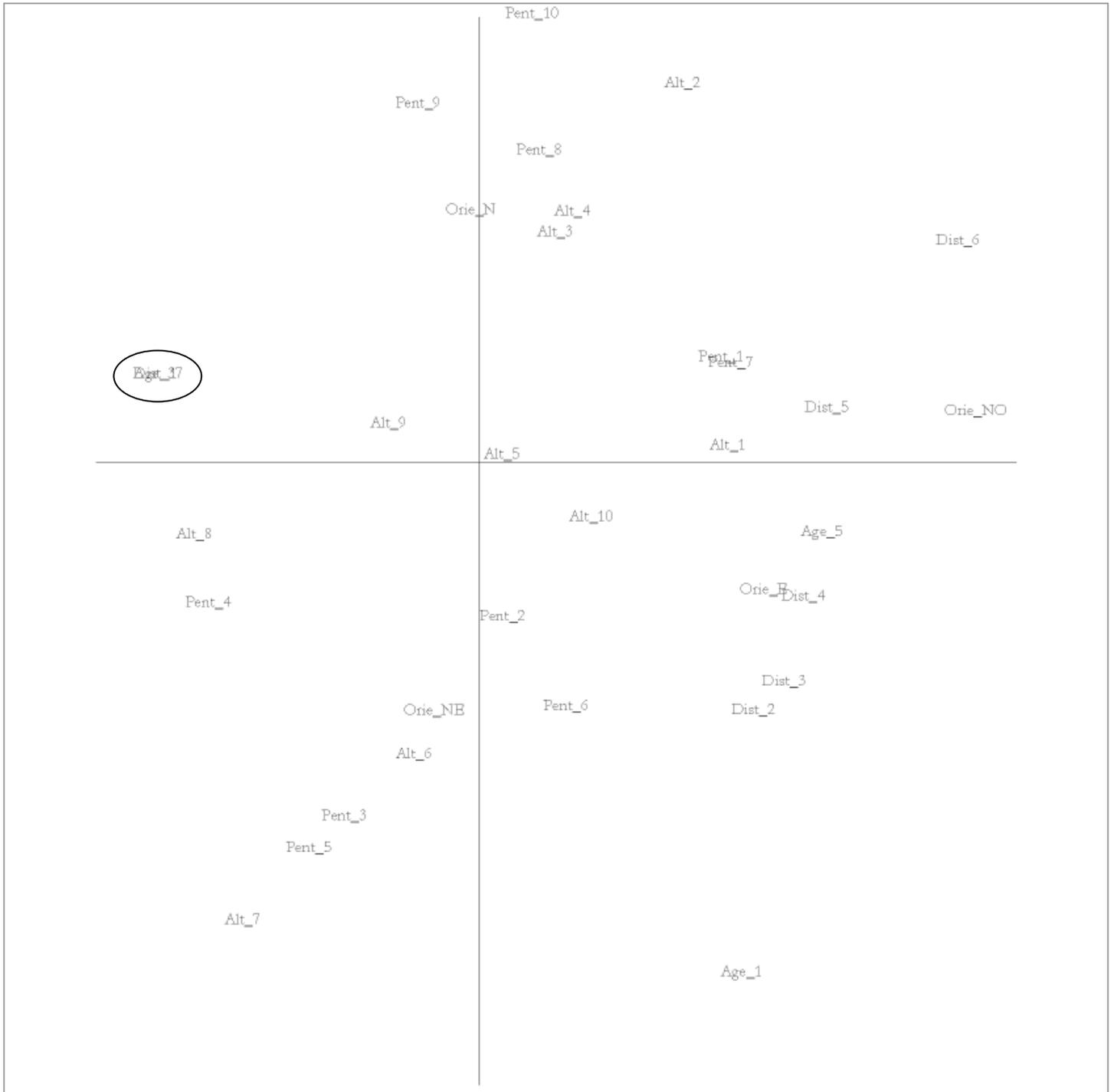


# Axes 2 et 3



AFC 5

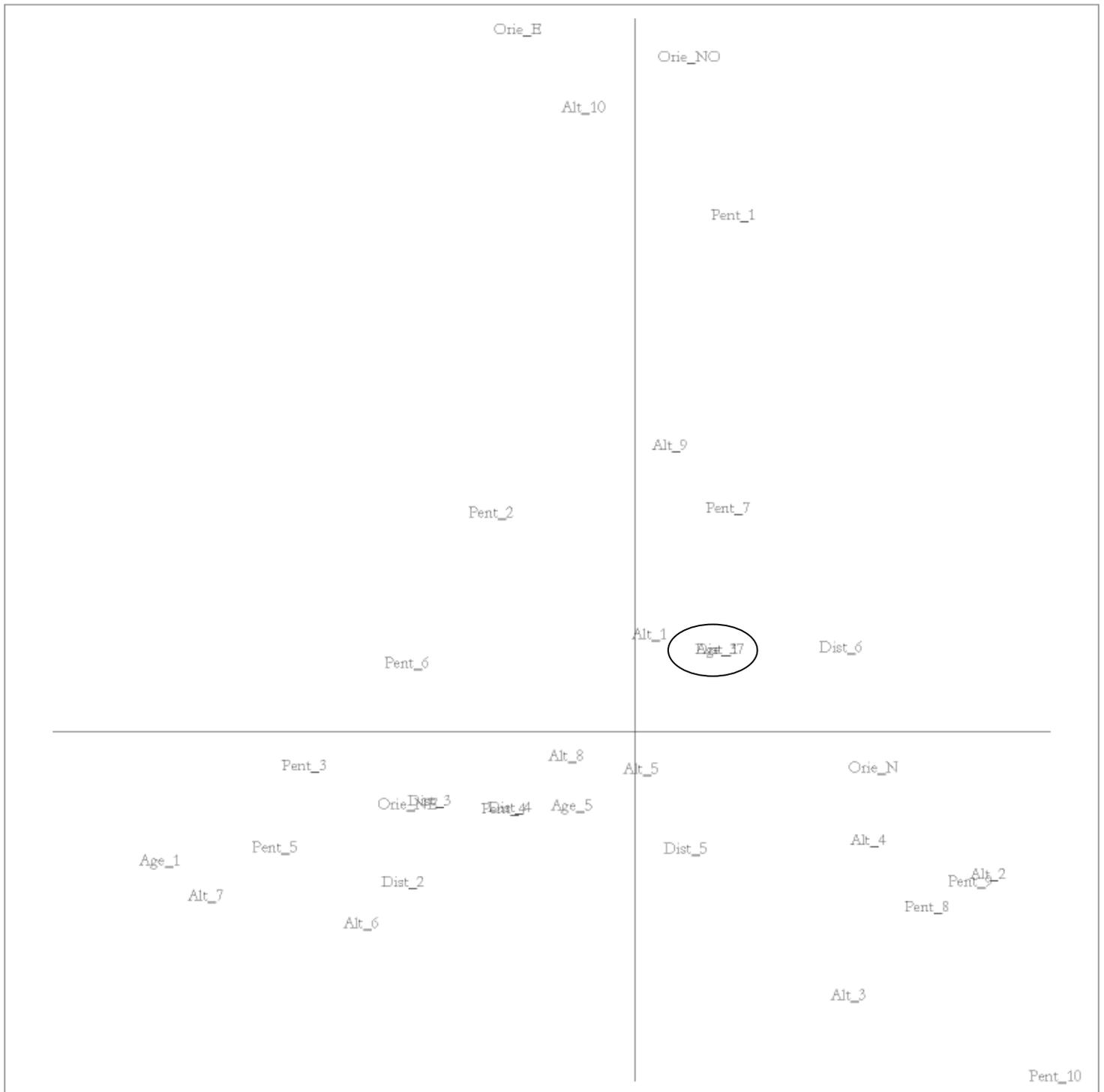
Axes 1 et 2



# Axes 1 et 3

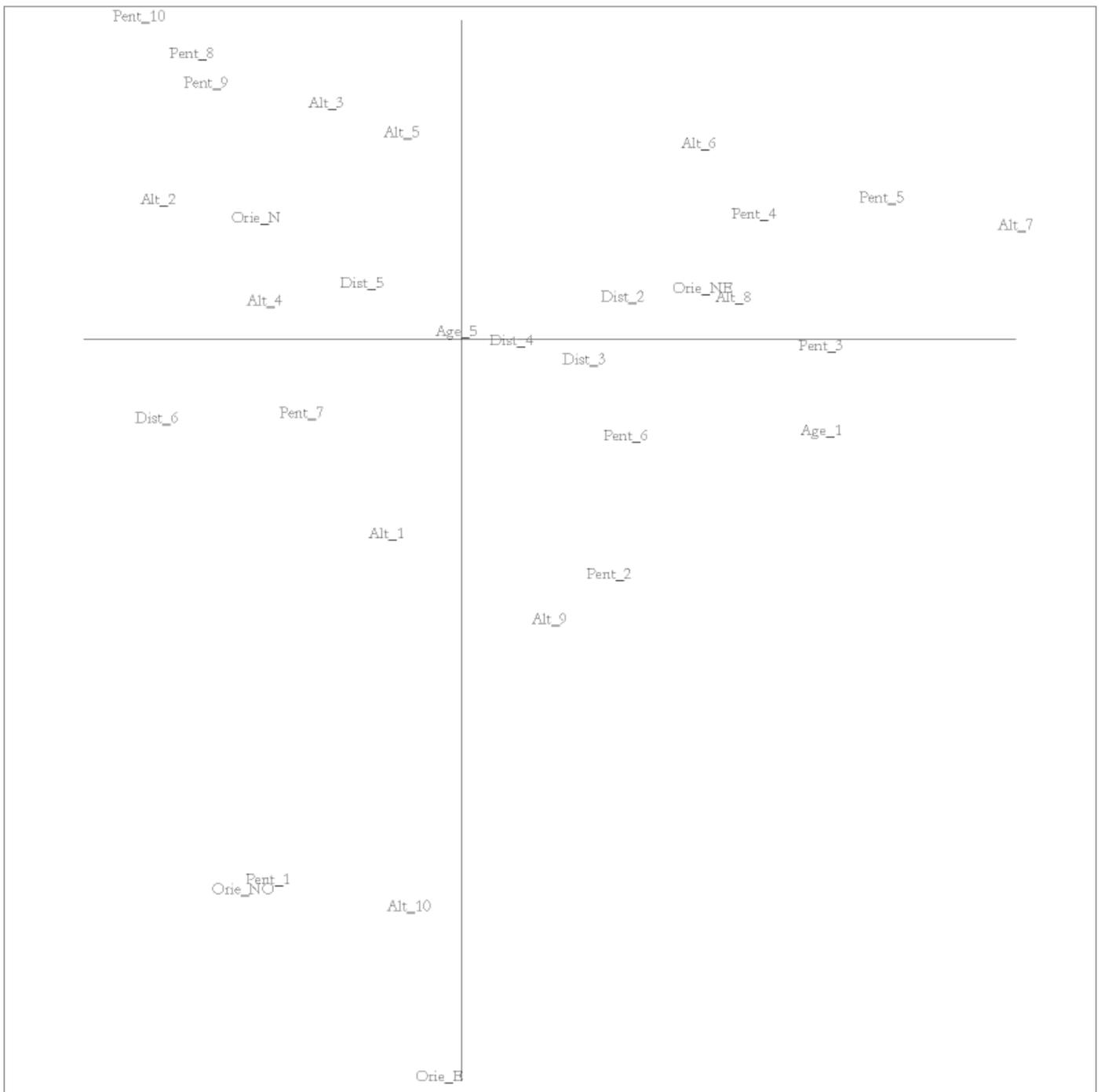


### Axes 2 et 3



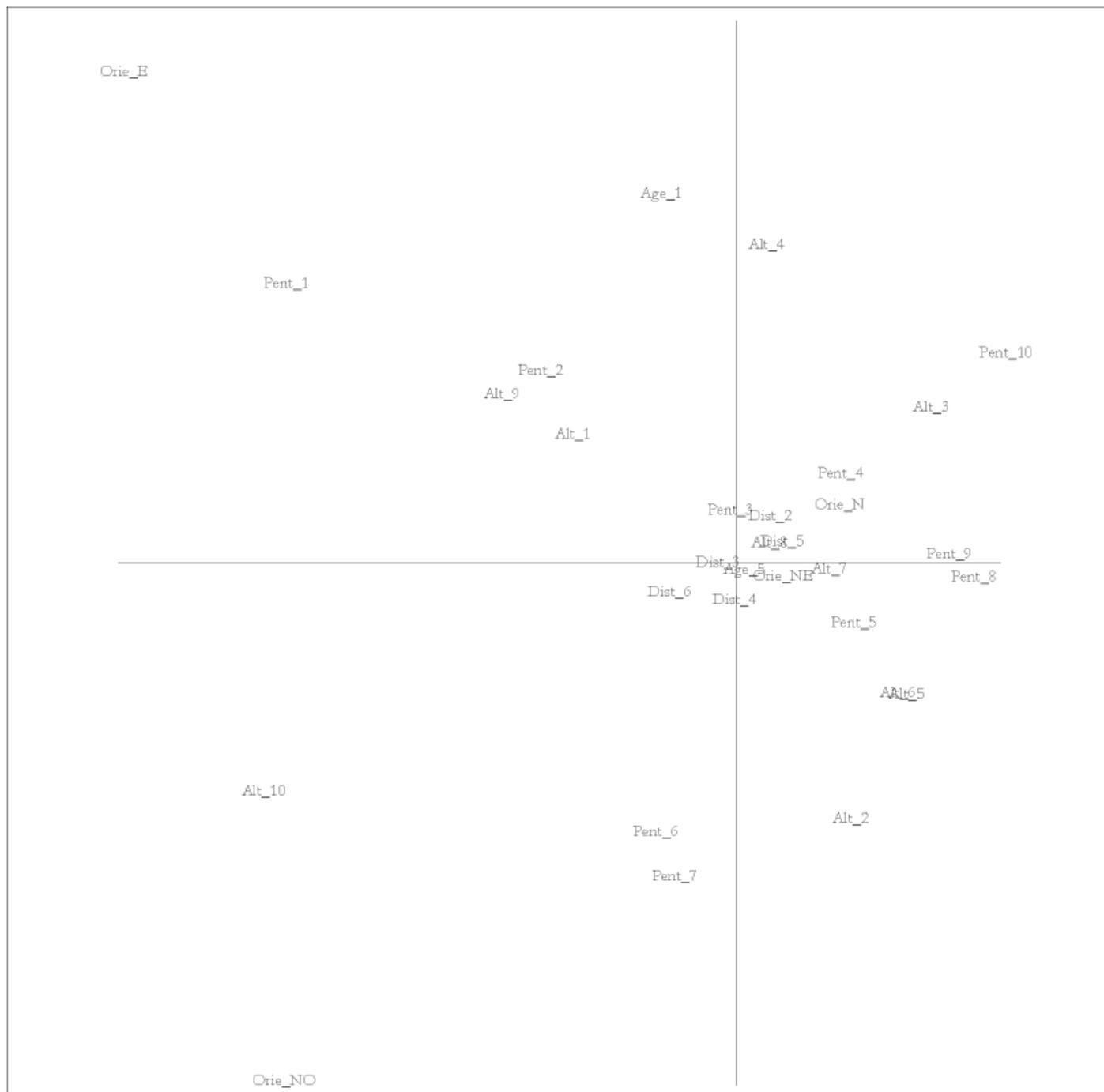
AFC 6

Axes 1 et 2



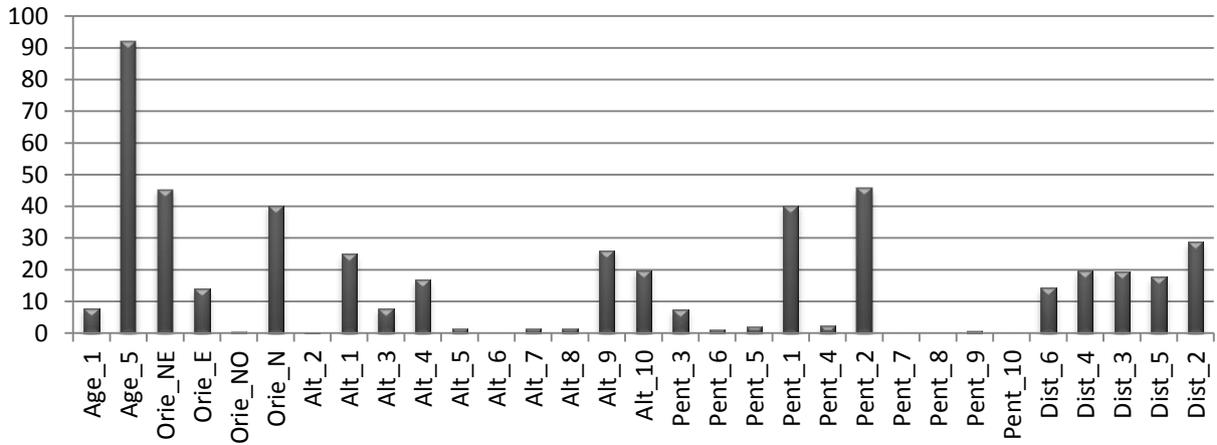


## Axes 2 et 3

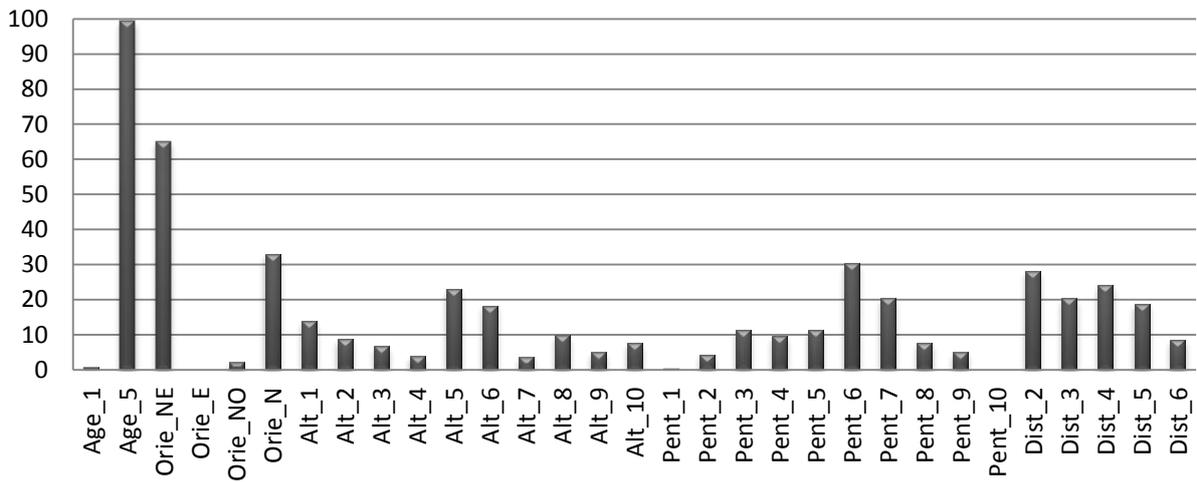


## ANNEXE 2 : Descriptif des classes issues de la classification ascendante hiérarchique

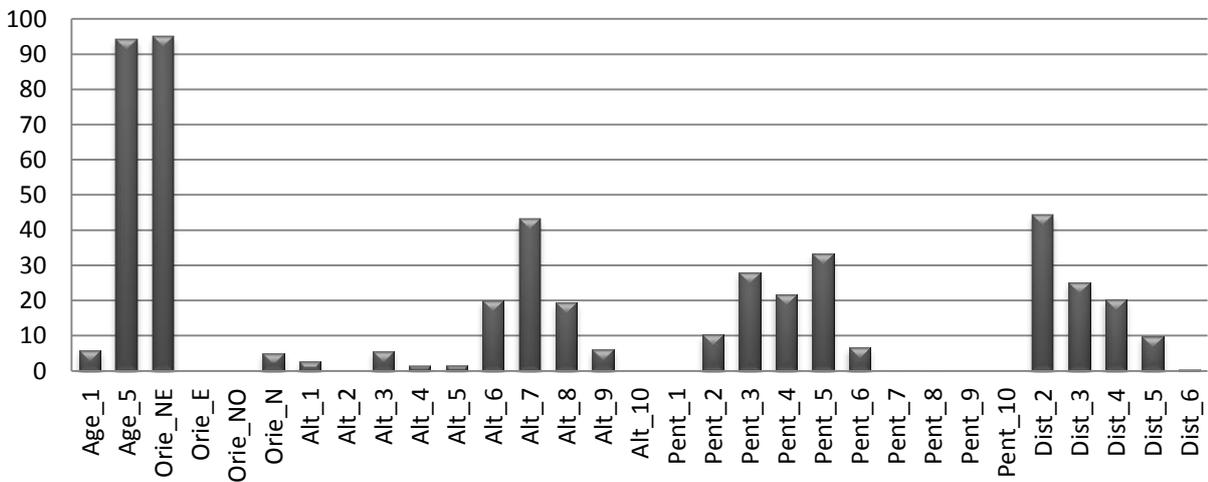
### Classe 1



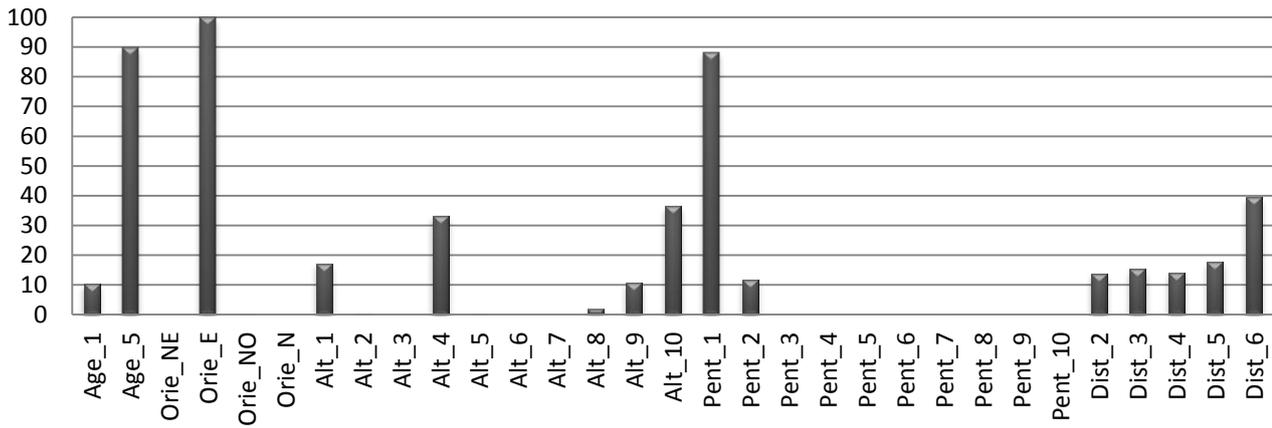
### Classe 2



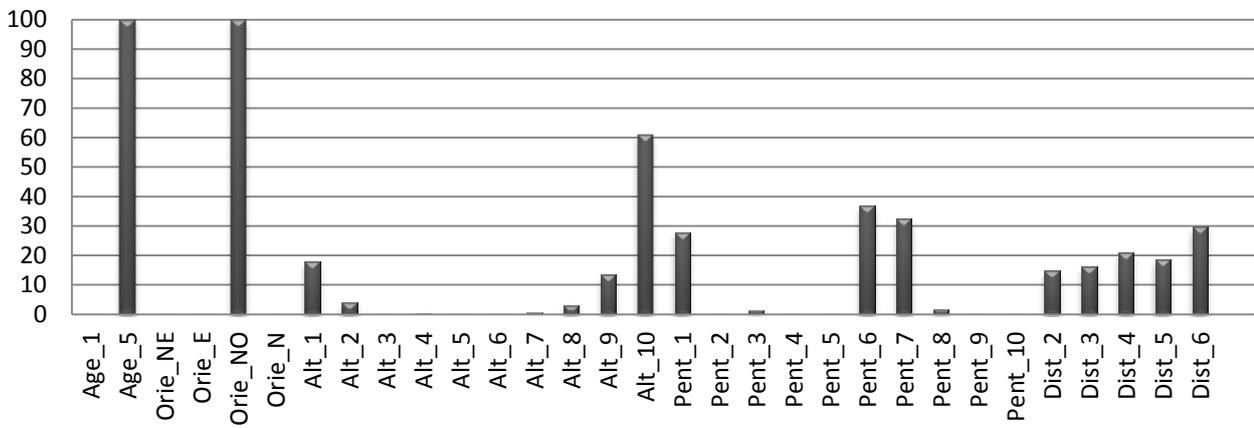
### Classe 3



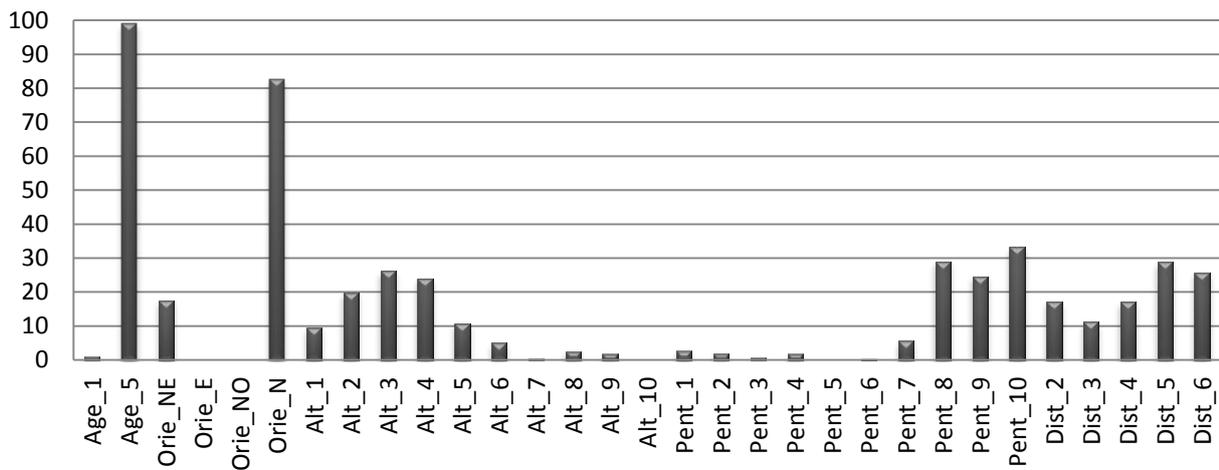
Classe 4



Classe 5



Classe 6



Classe 7

