Phytoarchéologie : impact d'occupations archéologiques sur la flore actuelle (historique, concepts, méthodes et études de cas)

Quentin Lemouland

▶ **To cite this version:**

Quentin Lemouland. Phytoarchéologie : impact d'occupations archéologiques sur la flore actuelle (historique, concepts, méthodes et études de cas). Archéologie et Préhistoire. Université de Rennes 1, 2009. Français. NNT : . tel-01923377

HAL Id: tel-01923377

https://theses.hal.science/tel-01923377

Submitted on 15 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N°d'ordre : **3956**

THESE

présentée devant l'**Université de Rennes 1**

pour obtenir le grade de **docteur de l'Université de Rennes 1**
mention **Archéologie et Archéométrie**

par

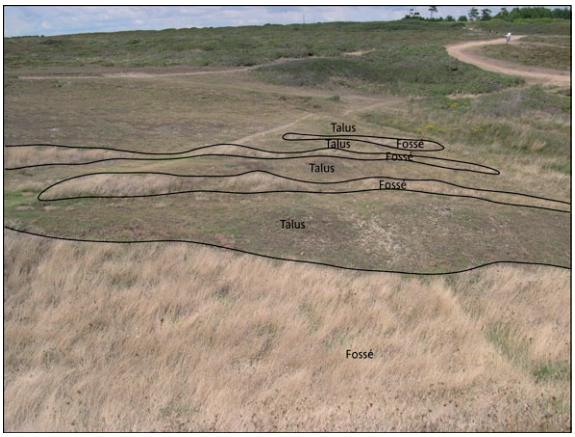
Quentin LEMOULAND

Equipe d'accueil : **UMR 6566, Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences et Histoire**
Labotatoire d'Archéosciences, Université de Rennes 1

Ecole doctorale : **Sciences de la Matière**

Composante universitaire (UFR) : **Structure et Propriétés de la Matière**

Phytoarchéologie :
impact d'occupations archéologiques sur la flore actuelle
(historique, concepts, méthodes et études de cas)



Volume 1 : texte

Présentée le 25 septembre 2009
devant le jury composé de :

M. Jean-Laurent MONNIER	Directeur de recherche, CNRS, Rennes	Directeur de thèse
M. Dominique MARGUERIE	Chargé de Recherches, CNRS, Rennes	Codirecteur de thèse
M^me^ Joëlle BURNOUF	Professeure, Université Panthéon-Sorbonne, Paris	Rapporteure
M. Jean-Luc DUPOUEY	Directeur de recherche, INRA, Nancy	Rapporteur
M. Didier LE COEUR	Maître de conférences, Agrocampus Ouest, Rennes	Examinateur
M. Christian WALTER	Professeur, Agrocampus Ouest, Rennes	Examinateur

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS 1

LISTE DES ABBREVIATIONS 5

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 7

1.1 Vers une archéologie des milieux semi-naturels : la prospection botanique 7

1.2 Une écologie en mutation 9

1.3 Constats du DEA : Des résultats prometteurs mais aussi des points d'ombre 12

1.4 Problématiques en suspens 12

CHAPITRE 2 HISTORIQUE DES RECHERCHES SUR LES ESPECES ARCHEO-INDICATRICES 15

2.1 Etudes en France 15

2.2 Etudes dans le reste de l'Europe 25

2.3 Etudes sur le continent Américain 29

2.4 Etudes sur le continent Africain 34

2.5 Naissance d'une discipline…mais laquelle ? 34

Résumé 37

CHAPITRE 3 SYNTHESE DES MODALITES POSSIBLES DE CETTE PRESENCE PREFERENTIELLE : APPROCHE BIBLIOGRAPHIQUE PAR L'EXEMPLE DU FRAGON PETIT HOUX 39

3.1 Plantes introduites 40

3.2 Plantes favorisées 50

3.3 Plantes reflétant un stade dynamique différent 60

Résumé 62

CHAPITRE 4 CHOIX DES SITES D'ETUDE 65

4.1 Modalités de choix 65

4.2 Problèmes rencontrés 68

4.3 Réponses aux problèmes rencontrés 70

Résumé 71

CHAPITRE 5 SITES D'ETUDE CHOISIS 73

5.1 Le Goënidou (Berrien, Finistère) 73

5.2 La Montagne (Visseiche, Ille-et-Vilaine) 80

5.3 Pointe de Kervédan (Groix, Morbihan) 84

5.4 Forêt de Pont-Calleck (Berné, Morbihan) 97

Résumé 104

CHAPITRE 6 METHODOLOGIE 107

6.1 Etude de la végétation 107

6.2 Etude de l'écologie des espèces 115

6.3 Etude des sols 121

6.4 Etude des sites archéologiques 134

6.5 Attribution de variables d'environnement archéologique 139

6.6 Analyse statistique des données 140

Conclusion 142

CHAPITRE 7 RELATION SPATIALE ENTRE LES STRUCTURES ARCHEOLOGIQUES ET LES ESPECES VEGETALES ACTUELLES 143

7.1 Réponse de la strate arbustive (site de La Montagne) 143

7.2 Réponse de l'ensemble de la flore vasculaire à l'échelle du site (site du Goënidou) 149

7.3 Réponse de l'ensemble de la flore vasculaire à l'échelle des structures (site de Kervédan) 162

7.4 Vérification du caractère « archéo-indicateur » pressenti d'une espèce par des fouilles systématiques (site de Pont-Calleck) 179

7.5 Discussion générale 190

Conclusion 194

CHAPITRE 8 ANALYSE DE L'IMPACT DES OCCUPATIONS ARCHEOLOGIQUES SUR LA FLORE A TRAVERS LA NATURE PHYSICO-CHIMIQUE DES SOLS 195

8.1 Variation latérale à l'échelle du site (Site du Goënidou) 195

8.2 Variation latérale à l'échelle des structures (site de Kervédan) 206

8.3 Variation verticale (Site de Pont-Calleck) 215

8.4 Discussion générale 227

Conclusion 230

CHAPITRE 9 ANALYSE DE L'IMPACT DES OCCUPATIONS ARCHEOLOGIQUES SUR LA FLORE A TRAVERS L'ECOLOGIE DES ESPECES VEGETALES 233

9.1 Goënidou 233

9.2 Groix 252

9.3 Discussion générale 268

Conclusion 272

CHAPITRE 10 PERSPECTIVES : UN NOUVEL OUTIL DE BIOINDICATION AU SERVICE DE LA PROSPECTION ET DE L'INTERPRETATION ARCHEOLOGIQUE 275

10.1 Présentation du formulaire de bioindication de terrain 275

10.2 Limites d'utilisation 281

10.3 Perspectives 284

Conclusion 285

CHAPITRE 11 CONCLUSION GENERALE 287

11.1 Rappel du cadre de l'étude et de ses objectifs 287

11.2 Moyens mis en œuvre 288

11.3 Principaux résultats 289

11.4 Perspectives 291

BIBLIOGRAPHIE 295

GLOSSAIRE DES TERMES ECOLOGIQUES 323

TABLE DES ILLUSTRATIONS 327

Liste des tableaux 327

Liste des figures 327

TABLE DES MATIERES 337

Remerciements

Ce travail n'aurait pu, bien évidemment, exister sans l'aide d'un grand nombre de personnes.

Il n'aurait pu aboutir sans que le jury accepte de juger ce travail. Joëlle Burnouf, Jean-Luc Dupouey, Didier Le Coeur, Dominique Marguerie, Jean-Laurent Monnier et Christian Walter m'ont fait l'honneur d'accepter ce rôle. Certains d'entre eux l'avaient déjà accepté pour ma soutenance à mi-parcours et m'avaient émis des remarques très constructives qui m'ont beaucoup aidé dans ma réflexion.

Ce travail n'aurait pas vu le jour sans l'intervention d'Anne Poszwa, qui lors d'un poste d'ATER à l'Université de Rennes 1, m'a annoncé l'existence d'un stage de terrain en forêt de Tronçais dans l'Allier alliant botanique, pédologie et archéologie. J'y ai rencontré Etienne Dambrine, Jean-Luc Dupouey et Laure Laüt ainsi que Patrick Behr et Benoît Pollier. Cette rencontre a été décisive, elle m'a donné goût à ce sujet, qui allait devenir la phytoarchéologie. Quand j'ai eu à choisir le stage de mon DEA d'« Environnement et Archéologie », je me suis naturellement interessé aux recherches de Jean-Luc Dupouey et du Laboratoire de phytoécologie forestière de l'INRA de Nancy.

A l'issue de ce DEA, de retour à Rennes, j'ai rencontré Jean-Claude Lefeuvre qui, connaissant mon parcours, m'a invité à visiter la pêcherie ancienne de Saint-Jean-Le-Thomas. J'y ai rencontré Vincent Bernard qui m'a fait confiance et m'a fait intégrer l'UMR CReAAH à travers des contrats en xylologie et dendrochronologie. Là, j'y ai fait la connaissance de Dominique Marguerie et Jean-Laurent Monnier, qui ont tout de suite été intéressés par mon sujet, m'ont soutenu dans mes démarches, et ont accepté de diriger cette thèse. L'UMR CReAAH a été une équipe d'accueil parfaite. Sans le soutien logistique de Marie-Thérèse Ribault, de Michèle Tostivint et de Catherine Louazel qui a pris sa suite, je ne sais pas comment j'aurai effectué ce travail. Guirec Querré, qui était alors Directeur du laboratoire, y est aussi pour beaucoup et m'a aidé à obtenir une bourse BDI. Yannick Pons et Jérôme Biasotto de la Région Bretagne et Nathalie Blanchard du CNRS m'ont beaucoup assisté dans mes démarches pour obtenir ce financement.

En début de thèse, et même avant, j'ai bien entendu cherché des sites d'étude. De nombreuses personnes m'ont aiguillé dans mes choix. Pour la botanique, nombreux ont été ceux à trouver un intérêt pour mon sujet et à me proposer des zones d'étude : Jacques Baudry, Françoise Burel, Yann Rantier et Claudine Thenail de la Zone Atelier Pleine-Fougères ; Louis Diard du Conseil Général d'Ille-et-Vilaine ; Sylvie Magnanon du Conservatoire Botanique National de Brest ; Cyril Barnerias et Anne-Marie Bertrand de l'Inventaire Forestier National. Nombreux aussi ont été les archéologues à me proposer l'accès à des sites : archéologues du SRA Bretagne avec Michael Batt, Christine Boujot, Christine Jablonski, Thierry Lorho, Jean-

Yves Tinevez et Anne Villard ; de l'INRAP Grand-Ouest avec Michel Bayeux, Anne-Louise Hamon, Xavier Henaff et Sandra Sicard; du CeRAA avec Catherine Bizien-Jaglin, Loïc Langouët, Guy Larcher et Jean-Bernard Vivet ; de l'Université de Nantes avec Jean-Noël Guyodo et Jean-Claude Meuret ; et bien sûr des indépendants avec Gwenaëlle Hamon, Laure Laüt, Yvan Pailler et Alain Provost. Yannick Beauvir et Alain Lalys, du CRCO, ont apporté une aide sérieuse à la prospection des milieux forestiers en fournissant l'ensemble des cartes de course d'orientation disponibles pour les forêts d'Ille-et-Vilaine, sur lesquelles ils ont répéré nombre d'anomalies de terrain.

Je n'aurais pu étudier les sites d'étude choisis seul.

- Le site de La Montagne a été une chance inespérée pour moi. Jean-Claude Meuret est venu à moi me présentant un site déjà fouillé dans les parcelles adjacentes à la haie. Il a accepté avec plaisir de m'aider dans mes démarches de relevés de la flore.
- Pour Le Goënidou, les travaux n'auraient pu être effectués sans l'aide de Michael Batt et de Christine Jablonski. Gwenhael Perrin m'a initié à la flore des landes et ma aidé à effectuer la biométrie de quelques tonnes de fougères. Lucie Maluza, Valère Bergier, Magali Gary, Aurélie Savignat, Delphine Henri, Marie-Fernande Prat, fouilleurs bénévoles, ont aussi mis la main à la pâte dans cette tâche fastidieuse. Philippe Guigon m'a initié aux joies de la photographie aérienne au dessus de ce site. Goulven et Anne Quentel m'ont hébergé chaleureusement pendant la période des relevés de végétation.
- Pour Kervédan, rien n'aurait pu se faire sans Marie Yvanne Daire et Nathalie Molines. Elles ont initié ce projet au sein de l'UMR CReAAH. Lors de la phase préparatoire, l'aide de Catherine Robert et de Frédéric Le Cornoux de la SEPNB, gardes animateurs de la réserve naturelle François Le Bail, a été la bienvenue. Je n'aurai pu préparer cette étude sans Thomas Lally qui m'a hébergé et avec qui j'ai appris à connaître Groix. L'étude géophysique de ce site n'aurait pu se faire sans l'aide de Florence Nicollin de l'UMR Géosciences Rennes, de Benjamin Bohard et d'Olivier Henry. Elle a été déterminante dans le choix de la zone d'étude. Stéphane Deschamps du SRA a soutenu ma démarche et m'a fait confiance dans l'implantation des sondages. Ils n'auraient pu être effectués sans l'aide des bénévoles qui ont travaillé dans l'urgence sous un soleil de plomb : Paméla Chanteux, Yohan Chantreau, Céline Choimet, Camille Domengie, Sophie Lescure et Antoine Menou.
- En forêt de Pont-Calleck, j'ai bénéficié des prospections de la mission archéologique de l'ONF. J'ai eu le plaisir d'y participer en compagnie de Cécile Dardignac, de Guillaume Benaily, de Pierre-Yves Caudal, de Valérie-Emma Leroux et de Cédric Bouchet. Ils m'ont aidé dans le repérage des pieds de fragon. La fouille de certains des pieds de fragon a été possible grâce à l'aide logistique de Philippe Ballu, de Michael Batt, de Stéphane Deschamps, de Frédérique Fromentin et de Christine Jablonski du SRA Bretagne ainsi que de François Le Quellec de l'ONF et de la mairie de Berné. Elle a été effectuée par David Aoustin, Cédric Chatellier, Véronique Guitton, Sophie Lescure, Fabien Lesguer, Axel Levillayer, Gwenhael Perrin et Emma Rambault, qui ont accepté de venir fouiller

avec moi, en pleine forêt, et en plein hiver. La céramique a été analysée par Charlotte Le Noac'h et la pièce de monnaie trouvée par Paul-André Besombes. Laurent Quesnel a accepté de se charger d'une partie du redressement des orthophotographies.

De retour au laboratoire, il a fallu analyser tous les prélèvements de sol. N'étant pas pédologue, j'aurais été incapable de choisir les analyses à réaliser sans le secours de Christian Walter et de Anne Jaffrézic de l'UMR SAS. Béatrice Blaize, Rémy Dubois, Yannick Fauvel et Armelle Racapé, personnels de ce laboratoire, ont apporté une contribution importante à ce travail d'analyse. Les analyses ICP n'auraient pu être effectuées sans le concours de Guirec Querré et de Jean-Christophe Le Bannier de l'UMR CReAAH. Aurélia Azéma, Laurie-Anne Jouanno et François Lanoë ont, tout en se formant, permis la réalisation de ce nombre important d'analyses. Les graines trouvées dans les prélèvements ont été déterminées par Manon Cabanis, carpologue à l'INRAP Rhone-Alpes Auvergne.

Toute cette masse de résultats n'aurait pu être analysée sans des analyses statistiques. Denis Poinsot m'a transmis le goût des statistiques et du langage de programmation « R ». Jean-Sébastien Pierre m'a aidé dans la réalisation des analyses logistiques, que je n'ai finalement pas utilisées, mais qui m'ont beaucoup appris sur le fonctionnement de « R ». Les membres du forum « R » du CIRAD m'ont amené à mieux comprendre la logique de ce langage, notamment Maxime Logez et Olivier Delaigue du Cemagref d'Aix-en-Provence. La réalisation des fonctions utilisées pour le site de La Montagne n'a pu être effectuée que suite à une formation sur les statistiques spatiales par Sébastien Ollier à Orsay. Nolwenn Le Meur de l'IRISA, que j'ai rencontrée grâce à Michel Le Borgne, m'a assisté dans cette tâche. Toute la synthèse des résultats par les Analyses Factorielles Multiples n'aurait pu être effectuée sans l'aide salvatrice de Jérôme Pagès du Laboratoire de mathématiques appliquées d'Agrocampus Ouest.

Concernant la bibliographie, il aurait été impossible de réunir toutes les références sans le soutien de Catherine Le Gall de l'UMR CReAAH ainsi que d'Odile Lecocq et de Marie-Dominique Pinel du Centre de documentation du SRA Bretagne. Les personnels des bibliothèques de Rennes 1, du Muséum National d'Histoire Naturelle et de l'EHESS ont particulièrement bien accueilli mes requêtes. Certains auteurs ont eu la gentillesse de me faire parvenir leurs travaux : Hans Henrik Bruun, Renaud Cazalbou, Zbigniew Celka, Katharina Dehnen-Schmutz, Annick Delelis-Dussolier, Wendy C. Hodgson, Alice Jannet, Odette Lapeyre, Christian Perrein et Elisabeth Veyrat. Jean-Charles Oillic et Luc Laporte de l'UMR CReAAH m'ont fait part de l'existence de certaines références particulièrement intéressantes. Les échanges avec Jean-Claude Bonnin et Michel Wienin sur le forum Tela Botanica m'ont apporté de nouvelles références bibliographiques.

La base de données écologique développée dans cette thèse a vu le jour dans sa forme définitive grâce aux échanges fructueux réalisés avec Jean-Claude Gégout, Richard J. Gornall, Mark Oliver Hill et Chris Preston.

Ce travail n'aurait pu atteindre son terme sans votre soutien à tous ainsi qu'à celui de mes proches, de ma famille et de mes amis, et en particulier, ceux qui ont accepté la relecture de ce manuscrit.

A tous, je vous remercie pour tout ce que vous avez fait. Mes pensées vont aussi à tous ceux que j'ai pu oublier par mégarde et à ceux que je ne reverrai plus.

Liste des abbréviations

ACM : *analyse des correspondances multiples*

ACP : *analyse en composantes principales*

AFDM : *analyse factorielle de données mixtes*

AFM : *analyse factorielle multiple*

AFNOR : *association française de normalisation*

ALC : *arts, lettres, communication*

BRGM : *bureau de recherches géologiques et minières*

BSBI : *botanical society of the British Isles*

CAH : *complexe argilo-humique*

CNA : *capacité à neutraliser les acides*

CEC : *capacité d'échange cationique*

CIRA : *commission interrégionale de la recherche archéologique*

CMT : *champ magnétique terrestre*

CNRS : *centre national de la recherche scientifique*

CSR : *competition-stress-ruderality*

DAISIE : *delivering alien invasive species inventories for Europe*

DEA : *diplôme d'études approfondies*

EA : *entité archéologique*

ECOFLORA : *ecological flora of the British Isles*

GPS : *global positioning system*

GRHAVS : *groupe de recherches historiques et archéologiques de la vallée de la Sumène*

IALE : *international association of landscape ecology*

ICP-AES : *inductively coupled plasma - atomic emission spectrometry*

IFN : *inventaire forestier national*

IGN : *institut géographique national*

INPN : *inventaire national du patrimoine naturel*

INRA : *institut national de la recherche agronomique*

INRAP : *institut national de recherches archéologiques préventives*

LHS : *leaf-heigth-seed*

LIDAR : *light detection and ranging*

MNT : *modèle numérique de terrain*

ONF : *office national des forêts*

PLANTATT : *plant attributes*

SEPNB : *société pour l'étude et la protection de la nature en Bretagne*

SIG : *système d'information géographique*

SRA : *service régional de l'archéologie*

UMR CReAAH : *unité mixte de recherche "Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences, Histoire"*

UMR SAS : *unité mixte de recherche "Sol Agro et hydrosystème Spatialisation"*

Chapitre 1 Introduction

1.1 Vers une archéologie des milieux semi-naturels : la prospection botanique

Les archéologues se tournent de plus en plus vers les sciences naturelles. Les disciplines paléo-environnementales sont notamment bien développées. La présence d'une flore actuelle particulière sur les sites archéologiques est aussi connue de longue date. Ces différences sont observées depuis longtemps au niveau de variations de croissance et de maturation dans les champs de céréales (Delétang, 1998). On les dénomme classiquement « crop marks ». Ces différences de flore intéressent fortement ces derniers pour la prospection. Pour les autres espèces, seules quelques anecdotes sur la présence de plantes comme le buis sur des sites gallo-romains existent dans la mémoire collective des archéologues.

1.1.1 Inefficacité des méthodes de prospection habituelles en milieux semi-naturels

Il existe différentes méthodes de prospection archéologique. Certaines permettent la détection de nouveaux sites. D'autres sont des outils d'investigation d'un site déjà répertorié, par des méthodes non destructrices, contrairement à la fouille. Les méthodes permettant la reconnaissance de nouveaux sites sont la prospection pédestre et la prospection aérienne. Les méthodes d'investigation sont de manière générale la géophysique et la géochimie (Ferdière, 1998).

La méthode pédestre permet le repérage de certains sites en élévation ou des mégalithes, clairement visibles dans le paysage. Elle est aussi basée sur le ramassage d'artefacts dans les parcelles labourées. Ces artefacts peuvent avoir été entraînés loin des vestiges suite au labour destructif des vestiges sous-jacents. Cette méthode est longue et fastidieuse mais permet de découvrir de nombreux indices de sites. Les sites de la préhistoire ancienne ne peuvent généralement être détectés que par cette méthode.

L'essor de la prospection aérienne pendant la deuxième moitié du XX^{e} siècle a été une révolution dans la découverte des sites (Ferdière & Zadora-Rio, 1982). En un seul vol, de nombreux sites peuvent en effet être repérés. Cette prospection permet de repérer les structures directement par leurs différences de propriétés physiques vis à vis du milieu environnant. Les formes vues d'avion peuvent être dues à des différences végétales, hydrographiques, pédologiques ou topographiques (Delétang, 1998).

Les milieux couverts de manière permanente par la végétation semblent délivrer moins d'indices de sites. La flore serait un écran à leur découverte pour les deux types de prospection. Les milieux forestiers notamment sont considérés comme sous-échantillonnés, d'autant plus qu'ils n'ont pas bénéficié de l'archéologie préventive (Vigneau & Dardignac, 2001).

Cette hypothèse de sous-échantillonnage des milieux couverts par la végétation de manière permanente est facilement vérifiable. Il suffit de comparer la carte archéologique des sites connus et indices de sites à la carte d'occupation du sol. Afin de faire cette analyse

introductive, le SRA Bretagne a mis à disposition les données d'emplacement des Entités Archéologiques de la région[1]. Les données d'occupation du sol utilisées sont celles de la mission 2000 de Corine Land Cover[2]. Pour les deux types de données, une extraction a été effectuée. Seules les données situées dans la Bretagne administrative ont été récupérées. Ensuite, pour l'occupation du sol, il a été décidé de classer les différents milieux en deux ensembles : les milieux hébergeant une flore permanente, et les autres milieux.

Les milieux hébergeant une flore permanente sont les espaces verts, les cultures permanentes, les prairies, les zones agricoles hétérogènes, les forêts, les milieux semi-naturels végétalisés ainsi que les zones humides[3].

Sur l'ensemble de la région, ces territoires représentent 16576.5 km2 soit 60.3% de la superficie de la Bretagne administrative. Les milieux non couverts de manière permanente par la végétation occupent pour leur part 10905.5 km2 soit 39.7% du territoire.

A partir de ces données, il a été facile de comptabiliser le nombre de sites ou d'indices de sites connus dans la base Patriarche du SRA Bretagne pour chacun de ces deux ensembles. 8215 (50.2%) entités archéologiques ont été inventoriées dans les milieux présentant une végétation permanente contre 8146 (49.8%) dans les autres milieux. Il apparaît clairement que la part de milieux couverte par une flore permanente est plus forte que celle non couverte par la flore, ou couverte de manière temporaire (terres arables). En revanche, le nombre de sites inventoriés dans chaque zone est sensiblement égal. On a trouvé proportionnellement moins de sites en milieu couvert de manière permanente par la flore. Le test du khi2 montre que cette différence est hautement significative et n'est pas liée au hasard ($p<2.2.10^{-16}$). On peut affirmer qu'il y a moins de sites connus dans les milieux couverts de manière permanente par la flore.

Cette différence peut être en partie liée à une réalité archéologique. En effet, les sites archéologiques ne sont pas dispersés au hasard dans le paysage. Il existe des zones de vide archéologique. Certains milieux naturels peuvent ainsi avoir de tout temps été épargnés par les occupations humaines. Cela peut être lié à un facteur extérieur, comme la fertilité du sol par exemple. Cependant, dans nos régions, les forêts primaires n'existent plus depuis longtemps. Cette réalité archéologique se vérifie peut-être en partie mais elle ne semble pas suffisante pour expliquer de telles différences.

Il existe aussi un biais dans cette analyse au niveau de la carte archéologique. Certaines entités archéologiques repérées anciennement sont mal localisées. Pour certaines, seule la commune est connue. Dans ces cas particuliers, leur localisation dans la base de données a été effectuée au centre des communes concernées. Ces entités sont donc indiquées en milieu urbain alors qu'elles peuvent très bien avoir été découvertes dans d'autres milieux. Cependant, ceci ne concerne qu'une minorité de cas et ne peut être à l'origine de la différence marquante démontrée.

Il semble en revanche plus juste de dire que cette différence est majoritairement liée à des

[1] Données transmises par T. Lorho, Ingénieur d'Etude désigné à la carte archéologique du SRA Bretagne.

[2] Shapefile récupéré sur le site de l'EEA : http://www.eea.europa.eu/.

[3] Codes Corine Land Cover de niveau 2 numéros 14, 22, 23, 24, 31, 34, 41, 42.

lacunes de prospection. Il est en effet connu de tous les prospecteurs que la flore masque la visibilité des structures en prospection pédestre. La plupart des prospecteurs aériens sont conscients que la détection des sites dans la végétation marche très bien dans des milieux où une seule espèce est présente. En revanche, dans les milieux à végétation diversifiée, ils avouent que la prospection aérienne est souvent inefficace. Les prairies, le bocage et les forêts sont connus comme étant difficilement « prospectables », et livrant peu de sites avec les méthodes classiques de prospection. Face à ce problème, la majorité des prospecteurs encouragent la création de nouvelles méthodes de prospection, notamment la prospection botanique.

1.1.2 Des sites très bien conservés mais menacés

Les sites archéologiques dans les milieux présentant une végétation diversifiée sont souvent très bien conservés. Echappant aux labours et à l'érosion, ils sont souvent intéressants d'un point de vue archéologique. Ils sont « fossilisés » : les élévations sont encore parfois visibles dans le paysage, notamment le parcellaire. Comme il a été vu précédemment, ces sites ne sont pas forcément connus du fait de l'inefficacité des prospections archéologiques classiques dans ces milieux.

Les milieux semi-naturels sont souvent menacés et fragiles. Ils n'échappent pas aux projets d'urbanisme et aux travaux d'aménagement :

- A l'heure du tourisme vert, certains de ces milieux sont très perturbés par les fréquentations et le piétinement.
- Les milieux naturels côtiers sont menacés par les phénomènes érosifs.
- Les prairies peuvent être labourées du jour au lendemain.
- En forêt, les nouvelles méthodes d'exploitation ont un lourd impact local sur les sols et la flore.

Toutes ces menaces sur les milieux sont aussi des menaces pour les sites qu'ils contiennent. Certains sites peuvent ainsi se trouver arasés sans que personne ne s'en rende compte. Il est souvent trop tard pour réaliser une opération d'archéologie préventive.

La prospection botanique peut être une alternative pour permettre de découvrir ces sites avant qu'ils ne disparaissent. Elle peut permettre, notamment à partir d'inventaires végétaux ou de relevés préexistants, de révéler certains de ces sites. Mais la prospection botanique n'est à l'heure actuelle qu'un projet idéal et ne peut être réalisée que par des botanistes, des écologues.

1.2 Une écologie en mutation

L'écologie est en mutation. Elle se tourne de plus en plus vers les sciences humaines. Peut-être est-ce enfin le moment attendu des archéologues, où l'utopie de la prospection botanique peut devenir réalité.

1.2.1 De l'écologie à l'étude des écosystèmes

Au sein des sciences naturelles, l'écologie est une discipline assez récente. Le terme d'écologie n'apparaît que dans la deuxième moitié du XIX^{e} siècle (Haeckel, 1866).

Etymologiquement, elle étudie la relation des êtres vivants avec leur milieu. Cette discipline est, à ses débuts, très liée à la botanique. En effet, il est plus aisé d'étudier les relations du milieu avec des organismes « inanimés ». L'écologie de l'époque hérite de la géographie botanique. Il faut attendre la fin du XIX^{e} siècle pour que le terme d'écologie prenne enfin son sens sous la plume de E. Warming (Acot, 1988). L'écologie animale ne naît qu'en 1927 grâce à C. Elton (Elton, 1927). L'écologie généraliste, quant à elle, trouve ses bases dans les travaux de F.E. Clements qui introduit la notion de biome (Clements, 1916). Le biome est considéré comme l'entité biogéographique élémentaire constituée d'une formation animale et d'une formation végétale.

En 1935, A.G. Tansley propose non plus de considérer les biomes isolément, mais le système dans son entier. Il entend par là intégrer l'ensemble des facteurs physiques comme par exemple le sol et le climat. Il introduit ainsi le concept d'écosystème (Tansley, 1935). L'écosystème est le résultat de la création mentale d'une limite isolant une biocénose et son milieu physique, appelé par la suite biotope. Ce concept a révolutionné l'écologie. Il devient très vite l'unité de réflexion en écologie (Linderman, 1942). Cet attrait est notamment lié au fait que l'écosystème est avant tout un système. Il est constitué de différents compartiments unis par des liaisons énergétiques (entropie). Il est donc modélisable par des lois physiques. La cybernétique devient un outil majeur d'étude de ces écosystèmes (Patten, 1959).

Malheureusement, cette mathématisation de l'écologie nécessitait de travailler sur des systèmes peu complexes où seuls quelques flux de matière et d'énergie existent. Les écosystèmes choisis étaient souvent isolés car plus faciles d'étude. Il pouvait s'agir d'îles ou de grandes étendues naturelles, considérées comme homogènes, dont on pouvait étudier une partie représentative. La recherche de ces écosystèmes types a finalement vite été freinée. La nature est plus complexe qu'il n'y paraît. Il est difficile de trouver de tels écosystèmes types, car il existe un facteur très important dont on ne peut se soustraire : l'homme.

1.2.2 Prise en compte de l'homme dans l'étude des écosystèmes

La prise en compte de l'homme dans l'étude des écosystèmes est un fait assez ancien mais trop occasionnel pour constituer une discipline en soi. Il a fallu attendre les premières catastrophes « écologiques » pour que l'être humain soit enfin pris en compte dans le fonctionnement des écosystèmes. C'est la deuxième naissance de l'écologie, non plus en termes de science à part entière mais en termes d'idéologie environnementaliste. A partir de ce moment, l'homme ne peut plus nier son rôle sur la nature, qui avait jusque là été refoulé. L'homme fait partie de la nature. C'est alors le choc entre nature et culture. L'homme crée le paysage. L'écosystème classique, considéré comme aspatial et homogène, est une illusion. La nature est organisée spatialement. C'est ainsi que naît ou du moins se développe l'écologie du paysage dans les années 1980.

Le terme d'écologie du paysage avait initialement été introduit par C. Troll en 1939. Avant les années 1980, cette discipline ne s'est développée que par le biais de la cartographie écologique. Son essor est lié à la création de l'association IALE (*International Association of Landscape Ecology*) en 1982 regroupant des biogéographes et des écologues. Il est aussi dû à la publication de sa revue *Landscape Ecology* à partir de 1987 (Burel & Baudry, 2000).

L'écologie du paysage a, comme son nom l'indique, pour objet d'étude le paysage.
Le paysage est la perception de l'environnement à l'échelle de l'homme. Il est la résultante des interactions homme/nature. Cette discipline intègre l'espace et l'homme dans l'étude des écosystèmes. A l'intérieur des écosystèmes, l'homme crée de l'hétérogénéité spatiale mais aussi temporelle. L'écologie du paysage a pour grande mission d'étudier ces hétérogénéités.

1.2.3 Prise en compte de l'histoire dans l'étude des écosystèmes

L'écologie du paysage suppose une dimension temporelle en plus de la dimension spatiale. Dans le contexte de la naissance de l'écologisme, l'impact des usages actuels sur la transformation des paysages a très vite été intégré. Notamment, les politiques de remembrement ont fortement orienté les recherches dans l'Ouest de la France. Aux Etats-Unis, l'impact du morcellement et des feux de forêts a aussi abondamment été étudié. Récemment, les usages passés ont commencé à être intégrés, en particulier à travers l'étude des forêts.

Pendant longtemps, on a opposé les forêts secondaires aux forêts dites primaires. Les forêts primaires étaient considérées comme immémoriales et non touchées par les actions de l'homme. Le nombre de forêts considérées comme vierges a peu à peu diminué au fur et à mesure de découvertes de traces d'occupation humaines anciennes. Les forêts équatoriales, longtemps considérées comme l'exemple type des forêts primaires, recèlent toutes, en réalité, des traces anciennes d'anthropisation (Willis *et al.*, 2004). Actuellement, on parle plutôt de forêts anciennes et de forêts récentes. Chaque étude a sa date seuil pour différencier les deux types de forêts. Cette date est souvent celle des sources cartographiques les plus anciennes de la région considérée. L'étude des forêts anciennes, comparée à celle de forêts récentes, a mis en évidence des différences de composition dans de nombreuses études (Hermy *et al.*, 1999). Ceci a permis de distinguer des différences de vitesse de colonisation des espèces (Matlack, 1994, 2005). L'étude des connectivités anciennes a aussi permis de mieux comprendre la répartition actuelle des espèces (Lindborg & Eriksson, 2004). Enfin, les usages anciens avant colonisation forestière semblent jouer un rôle important sur la nature de la flore (Koerner *et al.*, 1997). Toutes ces recherches vont vers la naissance d'une nouvelle discipline : l'écologie historique (Balée, 2006 ; Hayashida, 2005).

L'impact du passé plus lointain sur le fonctionnement des écosystèmes est plus méconnu. Il n'est que depuis peu considéré par les écologues. Le colloque SYLVA 2004 « Forêt, archéologie et environnement », organisé par l'INRA de Nancy, illustre cet intérêt récent des écologues vers le passé lointain dans la compréhension des écosystèmes actuels (Dupouey *et al.*, 2007). Les travaux des archéologues deviennent de plus en plus utiles aux écologues. L'archéologie devient un outil servant à la meilleure compréhension des écosystèmes actuels. La collaboration entre archéologues et écologues ne va pas que dans un seul sens (Briggs *et al.*, 2006). Chacun trouve un intérêt à l'analyse de la flore des structures archéologiques. L'interdisciplinarité devient possible et la prospection botanique qu'imaginent les

prospecteurs tend à devenir réalité[4].

C'est dans ce cadre d'évolution de l'écologie, que j'ai effectué mon diplôme d'études approfondies (DEA) sous la direction de J.-L. Dupouey et E. Dambrine, chercheurs à l'INRA de Nancy.

1.3 Constats du DEA : Des résultats prometteurs mais aussi des points d'ombre

1.3.1 Des résultats prometteurs…

Lors de mon DEA sur la forêt de Haye en Lorraine, j'ai pu analyser la réponse de la flore en fonction de la distance aux différents types de structures archéologiques visibles en microtopographie (Lemouland, 2002). Ces structures sont des habitats identifiés de l'époque gallo-romaine associés à un réseau de voirie et à un réseau parcellaire.

Il est tout d'abord apparu que la végétation à proximité des structures archéologiques est différente du milieu environnant. Ces différences ont pu être observées à l'échelle du massif forestier de Haye. La présence de structures a donc *a priori* un effet sur la répartition actuelle de la flore.

Il est ensuite ressorti que la végétation à proximité des structures est caractérisée par une écologie particulière. L'analyse écologique a mis en évidence que les différences de flore observées peuvent-être liées à une modification durable du milieu au niveau des structures. A leur proximité, la flore reflète un milieu apparemment plus riche et plus fermé.

Enfin, il a été montré que des différences de flore en fonction du type de structures proches existent. En effet, la flore à proximité du réseau de voirie ancien est différente de celle à proximité des autres types de structures. La flore révèle un milieu *a priori* plus humide et plus acide à proximité des voies.

1.3.2 …mais discutables

Toutefois, au vu de l'échelle d'analyse, il n'est pas à exclure qu'il puisse y avoir un biais dans l'analyse. La répartition des structures n'est pas aléatoire dans le paysage. La topographie, mais aussi le type de sol, peuvent avoir joué un rôle dans le choix de l'implantation des habitats, donc du parcellaire et de la voirie associés. L'emplacement des grandes voies n'est pas non plus hasardeux. En effet, il semble, à l'œil, que les zones de plateau ou de rupture de pente ont été privilégiées. Or la flore répond aussi à la topographie ou au type de sol. L'ensemble de ces facteurs de milieu peut donc être à l'origine de la répartition des structures, comme des plantes. Les résultats énoncés plus haut montrent qu'il y a bien corrélation entre structure et flore, mais pas si le lien est réel ou juste lié à un facteur extérieur.

1.4 Problématiques en suspens

A l'issue de ce DEA, de nombreuses problématiques sont restées en suspens :

[4] Deux autres thèses sur le sujet sont aussi en cours pour les milieux forestiers : celle de Patrice Thuillier à Amiens pour la forêt de Compiègne et celle de Thomas Vigneau au MNHN pour la forêt de Rambouillet.

- La distribution singulière des plantes au niveau des structures archéologiques est-elle réellement liée à ces dernières ? Est-ce une vue de l'esprit ? Est-ce que ces observations sont anecdotiques ? Peut-on vraiment définir une nouvelle discipline ?
- Quelle est la nature possible du lien entre structures et végétation ?
- A quelle échelle faut-il étudier ces sites pour mettre en avant les phénomènes impliqués ?
- Le milieu forestier est-il adapté à ces études, d'autres milieux sont-ils plus favorables ?
- La typologie des structures et des aires d'occupation joue-t-elle sur la nature de la flore ?
- Est-ce qu'il existe des caractéristiques écologiques propres aux structures archéologiques ?
- Peut-on passer de l'étude écologique entre structures et végétation au niveau d'un site, à une prospection botanique appliquée à l'archéologie ?
- Cette prospection peut-elle être réalisée à l'aide d'une espèce seule ou faut-il se fier à l'ensemble de la végétation ?
- Faut-il refaire une étude lourde à chaque nouveau milieu naturel non encore exploré ou l'utilisation de caractéristiques écologiques récurrentes sur les sites peut-elle suffire ?

Cette thèse tentera de répondre à ces questions.

Tout d'abord, sera menée une analyse bibliographique des observations d'une flore particulière sur les structures archéologiques. L'ampleur de ces observations permettra de statuer sur la pertinence du lien possible entre flore et occupations archéologiques. Nous verrons alors s'il est possible de parler d'une discipline à part entière.

Sera ensuite réalisée l'analyse bibliographique des caractéristiques écologiques du fragon (*Ruscus aculeatus* L.), espèce souvent considérée comme poussant préférentiellement sur les structures archéologiques. Cela servira à mettre en évidence les modalités possibles à l'origine des différences de flore sur les structures.

Une synthèse sur les méthodes de choix des sites et d'analyse de ces sites sera ensuite effectuée. Cette démarche tentera de répondre aux problèmes d'échelle et de milieux d'étude.

L'analyse de plusieurs sites suivant ces méthodes sera effectuée. Cela permettra d'étudier le lien entre la répartition de la flore et les structures en fonction de leur typologie et des aires d'activité. L'étude de la physico-chimie des sols mettra en évidence les différences de caractéristiques de milieu sur les structures. L'accent sera mis sur les liens entre ces caractéristiques et la végétation. L'analyse écologique de cette flore sera ensuite menée en fonction de la répartition des structures. La comparaison avec l'étude des variables de milieu permettra de faire une synthèse des études sur ces sites. Les causes des différences de flores observées sur les structures pourront ainsi être définies.

Nous terminerons par la présentation d'un outil de bioindication développé à l'issue de cette thèse. Nous verrons son fonctionnement et ses limites et en quoi il peut être utile à la prospection botanique comme dans d'autres domaines de l'écologie.

Chapitre 2 Historique des recherches sur les espèces archéo-indicatrices

Pour commencer, il est nécessaire de faire un point sur l'état de la recherche. Lors de mon DEA, peu d'observations de présence d'une flore particulière sur les occupations archéologiques avaient été relevées. Elles étaient toutes localisées en France. Il s'avère nécessaire d'élargir la recherche géographiquement. Cette démarche devrait permettre de statuer sur la pertinence des liens observés entre flore et structures.

2.1 Etudes en France

La présence d'une flore particulière sur les sites archéologiques est un fait connu depuis longtemps en Europe et spécifiquement en France. Ce particularisme doit venir entre autres de l'importance numérique des sites archéologiques en Europe. L'impact de l'homme dans l'ancien monde est en effet flagrant, et ce depuis longtemps. Le paysage est très marqué par le passé. Les sites de toutes périodes ont depuis longtemps attiré le regard. Cette caractéristique peut aussi être liée au fait que l'écologie est une discipline née dans l'ancien monde.

2.1.1 Observations anciennes

Au XIX^{e}, certaines sociétés savantes s'intéressaient aussi bien à la biologie qu'à l'archéologie. Certains auteurs ainsi sensibilisés aux deux disciplines ont été particulièrement aptes à remarquer la présence d'une flore particulière sur les sites archéologiques.

2.1.1.1 Cas particulier du buis

S'il est une espèce qui a beaucoup fait parler d'elle, c'est bien le buis. Depuis le XIX^{e}, les botanistes s'interrogent sur son origine. Les archéologues, quant à eux, y voient un très bon moyen de repérer des sites archéologiques.

En 1830, lors de travaux de réfection de route dans la forêt de Beaumont-le-Roger (Eure), des vestiges gallo-romains sont mis au jour. A. Le Prévost remarque que les vestiges sont repérables aussi bien par la présence d'anomalies topographiques que par la présence de buis (*Buxus sempervirens* L.) (Delisle & Passy, 1862).

Lors d'une communication à la Société Botanique de France, F. Lenormant signale que cette coïncidence a pu être observée çà et là en Normandie (Lenormant, 1856). Il propose que cette observation du buis sur les sites puisse être le résultat d'une ancienne naturalisation. La présence fréquente du buis sur les ruines romaines pourrait aller dans le sens d'une introduction à cette époque. Suite à cet exposé, les avis des membres présents de la Société sont partagés. Certains confirment les faits observés via des exemples dans d'autres régions. D'autres ont remarqué la présence de ruines médiévales à proximité de pieds de buis. Enfin certains affirment ne pas avoir remarqué la moindre structure à proximité de stations de buis connues.

A. La Fons de Mélicocq, en réponse à F. Lenormant, expose ses recherches sur le buis dans le Nord-Est de la France (La Fons de Mélicocq, 1856). Le buis a parfois donné son nom aux

lieux où il pousse. L'auteur remarque en particulier le toponyme Buissière. Seul deux lieux portant ce nom ont été remarqués par l'auteur pour le Nord de la France. A Beaurain (Aine), l'auteur remarque que c'est le seul endroit du département où il a observé du buis. A la Buissière (Pas-de-Calais), l'auteur n'a pas observé de pieds de cette espèce. Toutefois, le buis était bien présent en ce lieu à l'époque médiévale. L'auteur a en effet trouvé aux archives d'Arras un texte relatant la cueillette du buis en ce lieu au début du XV^{e} siècle[5]. Il émet l'hypothèse d'une culture du buis pour la cérémonie du dimanche des Rameaux. L'auteur n'a pas observé de vestiges de constructions anciennes en ces lieux.

A.D. de Virville évoque que la présence de cette espèce dans le Massif Armoricain peut avoir plusieurs origines (Virville, 1935). Certains pieds peuvent persister à l'emplacement d'anciens jardins. Ces buis sont en général assez imposants. Leur présence peut aussi être due à des introductions à l'époque gallo-romaine comme l'a fait remarquer F. Lenormant. Dans de très rares cas, le buis pourrait aussi être spontané. Ce dernier cas concernerait certaines zones calcaires en limite du massif.

A.-H. Dizerbo va dans le même sens que A.D. de Virville (Dizerbo, 1962). Dans le Massif Armoricain, le buis n'est presque jamais spontané et indique la présence de jardins plus ou moins anciens. Il dresse une liste des localités où on le retrouve.

Lors d'une note sur la buxaie de Coudrée (Sciez, Haute Savoie), M. Bardel signale que ce boisement s'étend en limite du domaine de Coudrée (Bardel, 1961). Ce domaine est une ancienne propriété abbatiale puis seigneuriale. Même si l'auteur ne fait pas le rapprochement, cette proximité est à remarquer par rapport aux observations précédentes. Certains buis multi-centenaires sont très imposants et atteignent 80 centimètres de circonférence.

M. de La Fouchardière, inspecteur principal des eaux et forêts, signale une nouvelle station de buis en forêt de Coat-an-Noz (Belle-Isle-en-Terre, Côtes d'Armor) (La Fouchardière, 1962). Des amas linéaires de pierre, évoquant d'anciens murets, peuvent y être observés (observation personnelle). La majorité des buis est groupée au niveau d'affleurement de roches basiques. En dehors de ces affleurements qui ont dû servir de carrière, certains buis sont localisés sur les structures ou sur des charbonnières.

2.1.1.2 Cas des jardins de châteaux

Depuis longtemps, les châteaux ont fait l'objet d'inventaires de végétation. Ces herborisations ont permis la découverte de certaines espèces rares (Hardouin, 1833). D'autres sites ont fait l'objet de découvertes semblables (Cauvin, 1833). Ces observations ne servaient qu'à approfondir la connaissance de la flore française. La recherche en botanique était en effet tournée vers la chorologie. L'attribution de nouvelles espèces à la flore connue d'une région était alors la préoccupation principale.

Le caractère remarquable de certains arbres de parcs de châteaux a aussi attiré l'attention (Verlot, 1861).

[5] Cote et désignation du texte non précisées.

Il a fallu attendre que H. Lepage, pharmacien, adresse un mémoire[6] sur la végétation du château de Gisors(Eure)[7] à l'Académie de médecine pour que les premières interprétations se fassent. A. Chatin a été chargé par l'académie de faire un rapport synthétique de ce mémoire (Chatin, 1861a). Des rapprochements avec d'autres cas similaires et des observations personnelles l'amenèrent à aller plus loin dans l'investigation de ce sujet. Il propose à la Société Botanique de France que ces plantes, présentes préférentiellement sur les châteaux, ont été introduites pour leurs propriétés (Chatin, 1861b).

F. Kirschleger répond à A. Chatin (Kirschleger, 1862b) qu'il a déjà abordé le sujet dans sa *Flore d'Alsace et des contrées limitrophes* par un chapitre sur la flore des ruines anciennes (Kirschleger, 1862a). Il signale que Charlemagne, dans ses *Capitulaires*[8], a préconisé la culture de nombreuses plantes pour les jardins des *villae imperiales*. D'anciens auteurs de la Renaissance ont aussi listé et préconisé certaines espèces pour les jardins d'abbayes et de châteaux.

En 1908, une observation intéressante a été réalisée au château de Salm (Pierre-Percée, Meurthe-et-Moselle)[9] au cours d'une excursion de la Société Botanique de France en Lorraine, (Guinier & Maire, 1908). La flore de la crête où se situent les ruines du château et le versant en contrebas a été étudiée : les espèces observées sont nettement calcicoles et sont atypiques sur ce substrat gréseux. Une analyse fine a montré que cette présence est sûrement due au mortier utilisé pour la construction du château. Après sa démolition, ce mortier a été lessivé et une partie du calcium a été entraînée jusqu'en bas de pente. Au niveau de suintements, celui-ci a précipité et formé des concrétions. Ces dernières sont en particulier colonisées par deux espèces de fougères : *Asplenium trichomanes* L. et *Asplenium ruta-muraria* L. Parallèlement, une étude des mousses a été effectuée par A. Coppey (Coppey, 1908). Presque toutes les espèces sont observées pour la première fois dans les Basses Vosges. Elles sont typiques des pays calcaires. Aucune espèce silicicole ou calcifuge n'est présente.

L. Faurel remarque aussi une flore particulière sur les vieux châteaux du Quercy (Faurel, 1947). Le château Renaissance d'Assier (Lot)[10] attire particulièrement son attention. Il y observe *Alyssum edentulum*. Cette espèce orientale pousse sur les murs ruinés du château. En revanche, les murs ruinés des maisons avoisinantes ne sont pas colonisés. Ce particularisme l'interroge. Il pense que ceci ne peut venir que de différences de substratum. Il réalise alors cinq prélèvements de sols se développant sur les murs et décombres du château. *Alyssum* est présent à chaque fois. Il réalise aussi trois prélèvements sur les murs environnants où *Alyssum* est absent. L'analyse chimique de tous ces prélèvements est claire. Il existe des différences de substrat. Au niveau des murs du château, le sol est plus sableux et moins calcaire. Cette différence doit venir de la constitution même des mortiers utilisés pour l'édification des murs.

[6] Mémoire non consulté.

[7] Château classé construit au XI-XII^{e} siècle.

[8] Acte législatif de l'époque carolingienne.

[9] La majorité des éléments architecturaux est attribuable au XIII^{e} siècle, classé monument historique.

[10] Construit entre 1518 et 1535 et classé monument historique en 1841.

L'auteur pense qu'*Alyssum edentulum* a sûrement été introduit. Il n'aurait subsisté que parce qu'il a trouvé dans les murs du château un substrat adéquat drainant et peu calcaire. Contrairement à l'étude précédente en Lorraine, le mortier du château est un milieu peu calcaire au sein d'une région calcaire.

A. Chevalier remarque une campanule à fleurs blanches lors d'une excursion dans l'Orne au château de Carrouges (Chevalier, 1951)[11]. Cette campanule est *Campanula balcanica* Jacq. var. *alba* Hort. Cette espèce croit de manière spontanée dans les montagnes d'Europe Centrale. Il semble donc qu'elle ait été introduite autrefois et qu'elle se soit depuis développée sur les murailles de ce château.

2.1.1.3 Cas des anomalies botaniques en milieux semi-naturels

Parallèlement à ces observations sur châteaux, J. de Saint-Venant, inspecteur des Eaux et Forêts, découvre une étrange anomalie dans la végétation de la forêt d'Orléans (Saint-Venant, 1888). L'ensemble de la forêt pousse sur les sables de l'Orléanais. La végétation habituelle est donc caractérisée par des espèces silicicoles et calcifuges. Pourtant de J. de Saint-Venant observe localement la disparition des espèces silicicoles au profit d'un « fouillis de végétaux calcicoles ». Son observation se base sur les ligneux et notamment la strate arbustive. Il renouvelle ces observations en de nombreux points. Pensant d'abord à un affleurement géologique de calcaire non répertorié, il reporte ses observations sur une carte. Ces anomalies se disposent suivant une coulée de 15 à 50 mètres de largeur s'étalant sur plus de sept kilomètres de longueur. Au vu de la rectitude de l'anomalie, il entrevoie la possibilité d'une construction humaine et entreprend des sondages archéologiques. Sur les trois sondages réalisés, il découvre la présence de blocs de calcaire organisés présentant toutes les caractéristiques d'une voie antique (Saint-Venant, 1888, 1889).

J. Christmann revient sur les travaux de J. de Saint-Venant (Christmann, 1970). Il observe lui aussi une végétation calcicole sur le terrain globalement acide de la forêt de Rambouillet (Yvelines). Cette végétation est cette fois-ci explicable par la présence de sites d'habitats antiques déjà répertoriés. L'utilisation de mortier calcaire dans la construction des murs explique la présence de cette flore particulière. J. Christmann observe des différences de composition de ligneux mais aussi d'herbacées. La mercuriale vivace retient particulièrement son attention. Il souligne que l'enrichissement des sols en matière organique sur site pourrait éventuellement être à l'origine des différences floristiques observées.

Parallèlement, J.-M. Couderc, biogéographe, découvre une anomalie de végétation dans les landes de Cravant (Indre-et-Loire) par photographie aérienne (Couderc, 1984). Cette anomalie indique la présence d'une ancienne voie. Elle est caractérisée par un recouvrement anormalement fort de bruyère à balai. Cette différence est due à un meilleur drainage au niveau de la voie. La modification locale de l'hygrométrie des sols par des structures peut donc aussi être perçue grâce à la nature de la végétation. D'après J.-M. Couderc, les espèces nitrophiles peuvent aussi être de très bons indicateurs de présence de vestiges (Couderc, 1983). Voulant faire une synthèse, il dit que toute végétation contrastant avec la végétation

[11] Ancienne place forte du VIVe ayant subit de nombreux réaménagements jusqu'au XVIII^{e} siècle, classé MH.

naturelle peut être indicatrice (Couderc, 1983, 1985). Il existerait trois types d'espèces :

- les espèces introduites sont des espèces non locales facilement identifiables et dont la présence est souvent connue ;
- les espèces directement favorisées par l'homme sont des espèces plantées mais présentes dans la région ;
- les espèces indirectement favorisées par l'homme sont les espèces répondant aux modifications du sol.

2.1.2 Recherches récentes et actuelles

2.1.2.1 Equipe de recherches Auvergnate

Lors de la réalisation de sa flore d'Auvergne, M. Chassagne a observé que certaines espèces poussent préférentiellement au niveau de sites archéologiques (Chassagne, 1956, 1957).

O. Lapeyre, a remarqué, pour sa part, que des sites du Cantal révélaient une flore particulière. La présence récurrente de la petite pervenche (*Vinca minor* L.) l'a particulièrement frappée. Etant convaincue que beaucoup de ces végétaux sont des espèces anciennement introduites, elle a créé un jardin ethnobotanique à Antignac. Elle a ainsi récupéré des graines, des bulbes et des boutures sur les sites, qu'elle a décidé de cultiver. Afin d'expliquer au public sa démarche, elle a réalisé avec E. Dodinet une exposition intitulée « l'homme et la plante » à Antignac (Cantal) avec le GRHAVS[12]. Cette exposition a été accompagnée d'un catalogue (Lapeyre & Dodinet, 1982). Dans cet ouvrage, les auteurs, après avoir classé les plantes en fonction de leurs liens avec les activités humaines, analysent la flore d'une quarantaine de sites. Ces sites sont en majorité des habitats désertés médiévaux à sub-actuels. Certains châteaux désertés[13] et des sites gallo-romains ont aussi fait l'objet de cet inventaire. Les espèces ont été classées en cinq catégories : les plantes cultivées et subspontanées, les plantes rudérales, les plantes calcicoles, les plantes adventices et les plantes de cueillette. Afin de promouvoir ce jardin, un nouvel ouvrage illustré a été publié récemment (Lapeyre, 2005).

S. Crozat reprend l'étude botanique de ces sites dans le cadre d'une maîtrise (Crozat, 1994, 1999). Il réalise un inventaire ethnobotanique sur une vingtaine de sites : seuls les végétaux influencés *a priori* par la présence de l'homme sont pris en compte. Il observe le degré de récurrence de ces espèces sur les sites. Ceci lui permet de mettre en évidence les espèces selon lui les plus fiables pouvant être utilisées en prospection archéologique. Il discute aussi sur les propriétés à l'origine de leur introduction éventuelle.

2.1.2.2 Equipe de recherches Limousine

J.-M. Desbordes, ancien directeur des Antiquités Historiques de Picardie puis du Limousin, redécouvre les travaux de J. de Saint-Venant et de J. Christmann. Il signale l'intérêt que peuvent apporter ces anomalies botaniques à la prospection archéologique en forêt

[12] Groupe de Recherches Historiques et Archéologiques de la Vallée de la Sumène.

[13] Majoritairement construits à l'époque médiévale et réaménagés.

(Desbordes, 1973, 1975). L'observation récurrente de buis sur des sites gallo-romains en Limousin renforce son intérêt (Desbordes, 1980).

Sur l'initiative de Desbordes, A. Ghestem et A. Vilks réalisent alors des inventaires de végétation sur 12 sites archéologiques limousins en 1979 (Ghestem & Vilks, 1979). Les sites concernés sont des sites assez diversifiés, que ce soit au niveau des fonctions qu'au niveau de la période d'occupation (*oppidum*, sites d'habitat gallo-romain, village déserté médiéval, mottes castrales, château, églises et fermes ruinées récemment). Ces inventaires leur permettent de remarquer la présence récurrente de certaines espèces sur les sites, comme le buis, la myrtille et la petite pervenche. Les auteurs observent aussi la présence de groupements rudéraux et nitrophiles.

Suite à ces observations, A. Ghestem initie l'étude botanique de quelques sites archéologiques du Haut-Limousin (Boyer, 1984a)[14]. Huit sites gallo-romains sont étudiés ainsi que huit sites médiévaux et six sites modernes et contemporains. L'étude consiste à réaliser un ou plusieurs relevés sur les sites et à comparer la flore avec un relevé témoin[15]. Les relevés sont réalisés sur les haies et les boisements. La végétation des sites diffère de celle des témoins par la présence anormalement forte d'espèces de sols frais et profonds à humus doux et d'espèces rudérales nitrophiles. Certaines espèces ont pu avoir été plantées autrefois. Leur présence actuelle signifierait qu'elles auraient perdurées depuis. Des différences végétales semblent se profiler entre les sites des différentes époques. Les sites gallo-romains présentent de nombreuses espèces thermo-xérophiles comme le buis, l'érable champêtre et le troène. Les sites médiévaux sont, quant à eux, caractérisés par les espèces nitrophiles et rudérales. Les sites récents ne présentent pas d'espèces particulières. Les espèces rudérales y sont moins nombreuses et les thermo-xéropliles sont quasi absentes.

Le château de Châlucet, un des sites étudié par J.-F. Boyer, refait l'objet d'un inventaire qui concerne cette fois les lichens. Il est réalisé lors d'une sortie de l'Association Française de Lichénologie en 1984 (Botineau & Vilks, 1985). Cette étude reste un simple inventaire. Aucun lien entre les espèces observées et la nature archéologique du site n'est réellement mis en évidence.

Après quelques temps, A. Ghestem relance l'étude végétale sur quatre sites archéologiques (Ghestem *et al.*, 1993). L'étude de ces nouveaux sites renforce les conclusions de J.-F. Boyer. Les chercheurs proposent la réalisation d'analyses pédochimiques pour confirmer l'origine pédologique des différences de flore. Le site de la *villa* gallo-romaine de Boin (Saint-Eloy-les-Tuileries, Corrèze) fait alors l'objet d'une nouvelle campagne de relevés (Ghestem *et al.*, 1994). Différentes espèces calcicoles indiquent la présence de structures. Ces espèces varient en fonction du degré de fermeture du milieu. L'analyse sommaire des relevés de sols montre des valeurs de pH sur le site anormalement élevées pour la région. Pour toutes les études postérieures à cette publication, pour tout nouveau site analysé, des mesures physico-chimiques de sol sont réalisées. Concernant la *villa* de Boin, les résultats de ces analyses n'ont été publiés que récemment (Ghestem *et al.*, 2006). Sur le site, le pH est accru ainsi que les

[14] Thèse ayant fait l'objet d'un article de synthèse : Boyer, 1984b.

[15] Cependant, trois sites médiévaux n'ont pas fait l'objet de relevés témoins.

concentrations en cations échangeables et notamment le calcium. Ces concentrations sont à l'origine d'un taux de saturation en base du sol plus élevé.

En 1995, une station remarquable de neutrocalcicoles à la Grange (St-Fréjoux, Corrèze) permet de découvrir la présence d'une villa gallo-romaine (Ghestem *et al.*, 1996). Les analyses de sol montrent un pH, un taux de saturation en bases et des teneurs en calcium anormalement élevés. Le rapport carbone/azote du sol est anormalement faible et indique donc une meilleure minéralisation sur le site. Le pH élevé du site peut être lié à la présence de mortier de chaux comme sur la villa de Boin. Il peut aussi être dû à l'utilisation comme matériaux de roches volcaniques ramenées d'Auvergne.

Afin de comprendre les causes de l'existence d'espèces indicatrices d'une période particulière, A. Ghestem initie une nouvelle étude sur des sites gallo-romains et médiévaux (Desbordes, 1996)[16]. Un de ses étudiants, B. Desbordes, inventorie quatre sites gallo-romains et cinq sites médiévaux. La période d'édification des sites ne semble pas discriminante contrairement aux présomptions de J.-F. Boyer. En revanche, la typologie des sites semble avoir une influence sur la flore. Les sites médiévaux sont représentés par trois mottes et deux châteaux. La flore des châteaux est nettement calcicole alors que celle des mottes est acidiphile. Cette différence semble liée à la nature des matériaux utilisés. Les mottes sont faites de terre alors que les châteaux de pierre utilisent du mortier de chaux. Au château de Ventadour (Corrèze), la présence de chaux est clairement visible au niveau des analyses de sols. Les taux de calcium échangeable sont énormes et le taux de saturation en bases est largement supérieur à 100% du fait de la présence de calcaire actif. La flore de ce site est ainsi nettement différente des autres sites de la région (Ghestem *et al.*, 1997a). Certaines espèces indicatrices de ces sites n'étaient pas présentes dans les études précédentes. En revanche, certaines espèces relevées par J.-F. Boyer ou par A. Ghestem ne sont pas apparues dans l'étude. La généralisation de l'existence d'espèces inféodées à un type de site est donc discutable.

Suite à ces bons résultats de pédochimie, A. Ghestem décide de revenir sur les travaux de J.-F. Boyer (Ghestem *et al.*, 2000 ; Ghestem *et al.*, 1999). Ces sites n'avaient en effet pas fait l'objet de prélèvements de sol. Une fois ces analyses effectuées, A. Ghestem propose de réaliser une synthèse des travaux effectués depuis 1979 (Ghestem, 2002, 2006). Son raisonnement est basé sur la distinction des espèces indicatrices en fonction des périodes : il ne prend que peu en compte les observations de B. Desbordes sur l'influence éventuelle de la typologie. Indépendamment des périodes d'occupation, la végétation des sites semble liée à une meilleure disponibilité des nutriments, des sols moins acides et à minéralisation rapide. Cette végétation est caractérisée par la présence d'espèces neutroclines à calcicoles et de nitrophiles. Ces différences de sols entraînent aussi la sous représentation des acidiphiles et acidiclines. La richesse spécifique des sites est toujours plus importante que celle des relevés témoins. Pour quelques sites, cette richesse est due, d'après l'auteur, à la diversité des biocénoses échantillonnées (milieux plus ou moins fermés).

Parallèlement à ces études sur le Limousin, la voie romaine de la forêt d'Orléans trouvée

[16] Thèse reprise en partie dans des articles : Ghestem *et al.*, 1997a ; Ghestem *et al.*, 1997b.

par J. de Saint-Venant est analysée (Ghestem *et al.*, 2003). Malgré l'éloignement géographique des sites limousins, certaines espèces indicatrices sont récurrentes. Le même type d'influence est aussi observé au niveau des groupes écologiques. Ces similitudes sont d'autant plus remarquables que le site étudié est une voie romaine alors que l'ensemble des sites étudiés en Limousin étaient des sites d'habitat. Les analyses pédochimiques montrent aussi des augmentations de pH, de calcium et de taux de saturation.

Il faut émettre quelques réserves sur toutes les analyses de ces auteurs. Les surfaces des relevés et des témoins ne sont pas connues. Concernant les relevés réalisés par J.-F. Boyer, ces surfaces ont tout de même été notées. Il apparaît que pour un même site, ces dernières varient. Il est alors difficile de comparer la flore entre relevés et témoins d'un site. Toutefois, les auteurs se permettent cette comparaison. Le nombre d'espèces d'un témoin est comparé au nombre d'espèces accumulées de plusieurs relevés. L'inégalité de surface entre relevés et témoins se voit ainsi accentuée. La richesse spécifique des relevés sur un site est logiquement supérieure à celle du témoin. Les espèces ont donc aussi plus de chance d'être relevées sur site que sur témoin. Malheureusement, ces témoins ne sont pas toujours judicieusement bien choisis. Ils sont parfois très loin des relevés et la physionomie de la végétation est souvent différente entre relevés et témoins. Les relevés sont souvent sur haies alors que les témoins sont presque toujours effectués dans des boisements. L'absence de traitements statistiques analytiques fait aussi cruellement défaut notamment dans la synthèse. Toutefois, les surfaces échantillonnées étant différentes, l'utilisation de tests statistiques est difficilement envisageable. L'analyse est trop basée sur les méthodes phytosociologiques et pas assez sur les méthodes analytiques. Il est aussi dommage que les études se bornent à la mise en évidence d'espèces et de groupements indicateurs et explorent peu les modalités de la présence de cette flore particulière. Les causes sont insuffisamment discutées et les auteurs ne distinguent pas que la flore des châteaux médiévaux se rapproche de celle des *villae* du fait de l'utilisation commune de mortier de chaux.

2.1.2.3 Equipe de recherches Picarde

Sur l'initiative de P. Racinet, G. Decocq réalise un inventaire de la flore du complexe castral et prioral de Boves (Somme) et de ses environs (Decocq, 1998). Il met en évidence sur le site la présence d'une végétation dominée par des espèces de milieux riches et d'espèces ayant potentiellement été introduites. Une de ses espèces, la jusquiame (*Hyosciamus niger* L.), aurait pu être cultivée comme plante médicinale à l'époque médiévale. Suite à ces premiers travaux, G. Decocq initie une étude botanique sur quelques mottes castrales picardes (Vieille, 2001). Ce travail, basé sur une démarche phytosociologique, met en évidence des associations végétales différentes sur les mottes par rapport au milieu environnant. Ces associations sont caractérisées par des espèces recherchant davantage de lumière et des sols enrichis neutres à basiques. Ces différences sont interprétées comme pouvant être liées à un reboisement récent des mottes. Ce facteur pourrait expliquer, d'après l'auteur, la présence d'espèces héliophiles et d'espèces introduites récemment comme le Seringa (*Philadelphus coronarius* L.). Ces propos sont à tempérer, beaucoup de ces espèces introduites sont

sûrement des échappées de jardins de châteaux à proximité (Decocq *et al.*, 2002). Leur introduction est donc bien postérieure à l'abandon des mottes. La présence d'héliophiles peut être due à une fermeture plus lente du milieu liée à la compétition désavantagée des espèces les plus forestières face aux espèces rudérales et notamment aux phosphorophiles. En forêt de Compiègne (Oise), une autre étude a été réalisée sur les sites gallo-romains fossilisés (Renaux, 2003). Ces sites sont aussi caractérisés par une végétation spécifique. La flore y est plus neutrophile, calcicline et nitrophile. La particularité de cette végétation serait due à des modifications durables des sols. Les sols de ces sites sont ainsi moins acides et sont enrichis en phosphore et matière organique.

Pour l'ensemble de ces études, les relevés sur sites présentent une plus forte richesse spécifique. Cette augmentation du nombre d'espèces serait liée à l'intensité des perturbations passées (Decocq *et al.*, 2002). D'après l'auteur, les différences végétales observées dans les communautés végétales actuelles sont la résultante de modifications durables des facteurs environnementaux et d'introductions anciennes d'espèces. Suite à ces travaux, G. Decocq propose une synthèse des travaux effectués au sein du département de Botanique de l'Université de Picardie (Decocq, 2004). Il tente ainsi de définir les principes et les méthodes de l'application de la botanique à la prospection archéologique. En plus de cet essai de synthèse, il évoque le cas intéressant de la Nivéole (*Leucojum vernum* L.) qu'il considère comme plante introduite sur les châteaux de la région Picarde.

2.1.2.4 Equipe de recherches Lorraine

En observant des différences flagrantes de végétation de part et d'autre d'anciens talus en forêt des Vosges, les équipes de l'INRA de Nancy se sont prises d'intérêt pour le sujet. En observant l'état des sections[17] du cadastre napoléonien, quatre usages anciens du sol de ces forêts ont pu être déterminés. Les parcelles pouvaient à l'époque être des forêts, des jardins, des parcelles labourées ou des pâtures. Des correspondances sont apparues entre les usages anciens du sol et la végétation actuelle de ces parcelles toutes forestières depuis un siècle. Ces variations semblent être le reflet de différences de sols. Les pâtures et forêts soumises au bétail ont transféré leur fertilité aux jardins et aux champs labourés via le fumier (Koerner *et al.*, 1999 ; Koerner *et al.*, 1997). Cette perturbation entraîne une modification de la nitrification (Jussy *et al.*, 2002).

De nombreux vestiges gallo-romains sont présents dans les forêts lorraines. Ayant connaissance de ces structures, l'équipe décide de réitérer l'analyse sur un îlot de bâtiments et son parcellaire associé. Le but est de voir si la perturbation des sols et de la végétation est encore visible après plus d'un siècle d'abandon. La végétation des zones perturbées par les structures est franchement différente du milieu environnant. Cette distinction se traduit par la présence d'espèces nouvelles au détriment des espèces habituelles. La flore des habitats et des enclos associés révèle un enrichissement du sol, de meilleures réserves en eau et une fermeture du milieu (Dupouey *et al.*, 2002).

Afin de voir si l'impact est le même en terrain acide, l'équipe refait l'expérience en forêt

[17] Informations relatives au type d'occupation du sol des parcelles données sur certains cardastres.

de Tronçais (Allier) au niveau de dix bâtiments gallo-romains. Les relevés sont réalisés suivant un gradient d'éloignement au centre des sites et dans différentes directions. La réalisation des relevés et des analyses de sol a été effectuée par une équipe d'une dizaine de bénévoles. Parallèlement, des sondages archéologiques ont été réalisés sur les habitats gallo-romains étudiés par cette même équipe sous la direction de Laure Laüt.

Suite à cette phase de terrain, plusieurs des bénévoles ont orienté leurs études sur ce sujet :

- L. Humbert a réalisé sa maîtrise sur les travaux de la forêt de Tronçais (Humbert, 2002). Il est ressorti que certaines espèces poussent préférentiellement sur et à proximité des structures. D'autres voient au contraire leur fréquence diminuer à proximité des structures. Cette modification de la végétation se traduit aussi par une nette augmentation de la richesse spécifique à proximité des structures. En intégrant dans l'étude les relevés réalisés sur l'ensemble de la forêt dans le cadre de la typologie des stations forestières, cette augmentation du nombre d'espèces est encore plus flagrante (Dambrine *et al.*, 2007). A proximité des structures, le pH est plus élevé ainsi que la concentration en phosphore et le rapport isotopique $\delta^{15}N$. Le rapport carbone/azote (C/N) est quant à lui plus faible.
- A. Jannet, pour sa part, a réalisé son diplôme d'études approfondies sur trois sites archéologiques en forêt de Châtillon (Villier-le-Duc, Côte-d'Or) (Jannet, 2002, 2003). Ces sites ont été découverts suite à une prospection systématique de la forêt (Pautrat, 2001, 2002). Ces trois sites ont été choisis du fait de leur comparaison possible au niveau géomorphologique. Le site de « Croix Chevalot » est un enclos associé à des bâtiments de période antique. Le site du « Petit Barlot »[18] est un enclos associé à une zone de lapiaz. Le site de « Badouillet » est aussi un enclos[19]. A l'intérieur de ce dernier, de nombreux amas de pierres sont visibles. Leur chronologie et leur fonction sont encore inconnues[20]. Sur ces trois sites, des relevés de végétation et de sol ont été réalisés. Ceux-ci ont été effectués sur site, à proximité et hors site. Malgré l'existence de variations stationnelles, il a pu être montré que, sur ces trois sites, la végétation était différente du milieu environnant. Il est apparu que dans les enclos, la richesse spécifique des relevés est plus élevée qu'en dehors. Le nombre d'espèces herbacées y est nettement plus important. La flore présente sur les sites est caractéristique de sols riches et peu acides.
- J'ai quant à moi réalisé mon Diplôme d'Etudes Approfondies sur la forêt de Haye (Meurthe-et-Moselle) (Lemouland, 2002). Cette forêt comporte de nombreux vestiges archéologiques d'époque gallo-romaine. Ces structures ont fait l'objet d'une cartographie GPS par l'INRA, l'ONF et moi-même. La campagne de prospection a permis de visiter totalement 3260 hectares sur les 10740 que représente le massif. Une centaine de bâtiments y ont été repérés. Parallèlement à ces bâtiments, le parcellaire ainsi que la voirie associés sont encore clairement visibles en microtopographie. Sur

[18] Datation du site en cours au moment du rapport.

[19] Ce site présente des éléments de datation allant de l'antiquité à la période médiévale.

[20] Une occupation protohistorique n'est pas à exclure si ces tertres s'avèrent être des *tumili.*

cette forêt, de nombreux relevés de végétation avaient été réalisés dans un souci de cartographie des stations forestières (Becker, 1979). Il m'a alors été possible d'analyser ces relevés en fonction de la distance aux structures. J'ai mis l'accent sur la typologie des structures qui était jusque là négligée dans les études antérieures. Malgré la forte hétérogénéité géomorphologique et géologique de la forêt, il est apparu que la proximité aux vestiges était un des facteurs majeurs de variation de la flore. A l'échelle de l'ensemble du massif forestier, il apparaît que la végétation à proximité des vestiges est différente du milieu environnant. Sur les vestiges, la flore semble refléter un milieu plus riche et plus fermé. Le réseau viaire est caractérisé par une végétation différente du reste des vestiges. Cette végétation indique un sol plus humide et plus acide. Cette caractéristique peut être due à la présence des fossés bordant la voirie alors que seules des structures en élévation sont visibles au niveau du parcellaire : les murets ne semblent avoir été bâtis qu'à l'aide de blocs issus de l'épierrement des parcelles attenantes, ils ne seraient pas accompagnés de fossés. En revanche, les autres structures ne montrent pas de différences de flore.

2.2 Etudes dans le reste de l'Europe

2.2.1 Belgique

En Belgique, les jardins de châteaux ont fait l'objet d'observations floristiques particulières. En 1989, lors d'une excursion au château de Houx (Yvoir, Province de Namur), J. Duvigneaud observe un certain nombre d'espèces singulières (Duvigneaud, 1990). Certaines espèces sont clairement introduites. Pour d'autres, l'auteur remêt en question leur statut d'autochtones sur la région. Pour certaines espèces, les individus observés appartiennent à une variété non présente naturellement dans la flore locale. Ces espèces ont pu être introduites pour leur aspect ornemental. Dans le parc du château de Xhos (Tavier, Province de Liège), le même type d'observations a été réalisé (Duvigneaud & Saintenoy-Simon, 1993). Il semblerait que ces espèces particulières aient été introduites par le comte F.-E. de Méan au XIX^{e} siècle. Là aussi, il s'agit de plantes d'ornement. A l'emplacement d'un ancien château, le parc de Paridaens (Beaumont, Province du Hainaut) a aussi attiré l'attention (Duvigneaud & Leurquin, 1994). La flore y est aussi assez singulière. Suite à ces travaux, le statut de l'anémone hépatique *Hepatica nobilis* dans la région de Liège a été abordé (Beaujean *et al.*, 1999). Il semblerait que cette espèce ne soit présente qu'au niveau de parc de châteaux. Elle aurait été anciennement introduite dans la région.

Les observations de l'équipe ont légèrement débordé du territoire Belge. Ainsi, Le même type d'étude a été réalisé en France sur le site de Saint-Bertauld (Chaumont-Porcien, Ardennes) (Duvigneaud, 1991). La flore originale observée serait liée à la présence d'un ermitage auquel a succédé un château puis une chapelle. De nombreuses espèces ornementales pourraient être liées à la présence de ces structures.

2.2.2 Allemagne

Dans la continuité de A. Chatin et F. Kirschleger, D. Brandes s'est intéressé à la flore des

châteaux allemands et de leurs parcs (Brandes, 1985, 1987, 1996). Il s'est aussi intéressé à la flore des villes médiévales (Brandes, 1995, 2001). Sa démarche de manière générale est une démarche d'inventaires en écologie urbaine. Ses travaux sur les châteaux sont en réaction aux recherches de W. Lohmeyer[21]. En effet, W. Lohmeyer ne s'était pas intéressé aux châteaux des Montagnes Noires étudiés par D. Brandes.

Suite à ces différents travaux, K. Dehnen-Schmutz réalise une étude végétale sur la flore de 56 châteaux dans le Sud de l'Allemagne (Dehnen-Schmutz, 2000). Comparée à la flore d'Allemagne, la flore de ces châteaux comprend un grand nombre d'espèces introduites. Par rapport au reste de l'Allemagne, les espèces introduites anciennement ont une place plus importante sur les châteaux. Ces espèces sont médicinales ou nutritives. Elles ont potentiellement pu jouer un rôle dans l'économie du site (Dehnen-Schmutz, 2004). Les espèces d'introduction récente ont plus un rôle ornemental. Elles sont peu nombreuses et ne semblent pas menacer le reste de la flore (Dehnen-Schmutz, 2001). L'auteur analyse aussi l'impact des châteaux sur la flore en fonction des usages actuels de ces châteaux (Dehnen-Schmutz, 1998). Les châteaux encore occupés sont potentiellement encore des zones d'introduction d'espèces. Son étude révèle que les châteaux toujours occupés ont autant d'espèces que les châteaux abandonnés. En revanche, la proportion des espèces introduites est plus forte sur les châteaux habités. Les espèces introduites, par rapport à celles du reste de l'Europe Centrale, sont en majorité d'origine Eurasiatique.

Parallèlement à ces études sur châteaux, un autre chercheur réalise une étude sur la petite pervenche *Vinca minor* L. (Prange, 1996). W. Prange constate que cette espèce est récurrente à proximité de ruines d'époque romaine. Il pense que cette espèce a été cultivée durant cette période. Les stations observées seraient des pieds relictuels de ces anciennes cultures.

2.2.3 Danemark

Au Danemark, le paysage est marqué par la présence de *tumuli*. Ceux-ci sont généralement bien préservés. Etant dans des milieux à végétation plutôt rase, ils se repèrent bien dans le paysage. Ces structures en attirant l'attention n'ont immanquablement pas pu échapper aux inventaires des botanistes. C. Raunkiaer, bien connu pour sa fameuse classification des types biologiques fit partie de ces botanistes (Raunkiær, 1926[22]). Il perçoit sur les *tumili* une végétation particulière.

Suite à ces observations, un inventaire botanique d'une dizaine de *tumuli* a été réalisé en 1961 (Grøntved, 1962[23]). La flore de ces structures a été inventoriée à nouveau en 2000. La comparaison avec les données de 1961 montre une évolution de la flore. De nombreuses espèces se raréfient ou disparaissent. Cette érosion de la biodiversité semble être liée à des changements des pratiques culturales (Nielsen & Bruun, 2003).

De récents travaux ont mis en évidence que les conditions actuelles ne permettent pas d'expliquer convenablement les variations locales de richesse spécifique. Les usages anciens

[21] Ouvrages non consultés (cités par Brandes, 1987).

[22] Article non consulté (cité par Nielsen & Bruun, 2003).

[23] Article non consulté (cité par Nielsen & Bruun, 2003).

du sol de l'Age du Fer notamment influencent la diversité végétale locale (Bruun *et al.*, 2001).

Il semblerait aussi que la flore spécifique de ces *tumuli* puisse être liée à des usages récents. L'allumage de feux sur ces *tumuli* semble avoir été une pratique courante. Elle a pu favoriser certaines espèces et en éliminer d'autres (Bruun, non publié)[24].

2.2.4 Estonie

Suite aux travaux réalisés au Danemark, une étude similaire a été menée en Estonie. Cette étude révèle que le nombre d'espèces présentes à l'échelle micro-régionale et la richesse spécifique locale sont supérieures dans les zones de fortes concentrations de sites de l'Age du Fer. (Pärtel *et al.*, 2007). Les usages protohistoriques semblent donc avoir nettement influencés la répartition actuelle de la flore aux échelles locales comme micro-régionales.

2.2.5 Pologne

Dans la lignée de C. Raunkiaer au Danemark, R. Bauch étudie aussi la flore des sites archéologiques (Bauch, 1937). Il s'intéresse particulièrement aux espèces introduites. La famille des Malvacées attire particulièrement son attention. Les espèces de cette famille sont nettement plus fréquentes sur les sites archéologiques qu'ailleurs.

A la suite des travaux de R. Bauch, Z. Celka commence en 1992 un inventaire botanique systématique des habitats fortifiés médiévaux de Grande Pologne (Wielkopolskie). Ces sites sont essentiellement des enceintes (141 sites) et des mottes terroyées (84 sites). Quelques châteaux ont aussi été pris en compte (8 sites). En 1999, Un premier état des lieux de ces travaux a pu être établi (Celka, 1999).

La flore de ces sites est intéressante. De nombreuses espèces peu communes voire rares y sont trouvées. Les sites servent de refuges à ces espèces (Celka, 2004b). Parmi les espèces trouvées sur les sites, certaines apparaissent comme étant d'éventuelles reliques de plantes anciennement cultivées. Cinq espèces ont notamment attiré l'attention : *Malva alcea*, *Lavatera thuringiaca*, *Allium scorodoprasum*, *Origanum vulgare* et *Lithospermum officinale*. Les propriétés de ces espèces ont été étudiées (Celka, 2000, 2005). Ces espèces ont pu être cultivées pour leurs propriétés médicinales, alimentaires, ornementales ou tinctoriales. L'ensemble de ces travaux a permis la réalisation d'un atlas de la végétation de ces sites de Grande Pologne (Celka, 2004a).

Suite à l'exécution de cet atlas, une analyse a été réalisée sur les poacées afin de voir si les sites ont une influence sur la nature des communautés végétales (Celka, 2007). Cette famille a été choisie car c'est une des familles les plus importantes du règne végétal. Les graminées sont souvent les espèces dominantes des formations végétales. Ce sont elles qui dessinent au sol les contours des associations végétales. Cette analyse montre que certaines espèces appartenant à cette famille semblent avoir des affinités avec les sites. Les graminées peuvent donc être de bons indicateurs de la présence de ces sites médiévaux.

Le cas de *Malva alcea* L. a aussi été observé avec attention (Celka & Drapikowska, 2008).

[24] Article non accepté pour la publication à ce jour intitulé : *Folklore, fire and flora on Bronze Age burial mounds in Denmark* (communication personnelle de l'auteur).

Il apparaît que les sites archéologiques sont l'habitat majoritaire de cette espèce. Dans cette région, cette espèce est présente sur 94 des 233 habitats médiévaux fortifiés inventoriés. Les voies de transport actuelles sont aussi un habitat récurrent. D'après les auteurs, *Malva alcea* aurait perduré suite à d'anciennes cultures. L'étude de la variation morphologique des graines de cette espèce n'a pas montré de différences flagrantes entre populations trouvées sur sites et populations trouvées hors site (Celka *et al.*, 2006a). L'étude microscopique des poils de cette espèce n'a pas non plus donné de différences (Celka *et al.*, 2006b).Les différences sont surtout liées à la localisation géographique générale de ces populations (Celka *et al.*, 2006a).

L'étude botanique de ces ouvrages fortifiés a aussi pris en compte leur environnement actuel (Kami'nski, 2006). La diversité floristique de ces habitats particuliers est maximale dans les milieux modérément perturbés.

2.2.6 Italie

En Italie, la ville de Rome est connue pour ses richesses archéologiques. Ces vestiges ont depuis longtemps fait l'objet d'inventaires de végétation et en particulier le théatre antique du Colisée. Ainsi dès 1643, D. Panaroli en a réalisé l'inventaire (Panaroli, 1643[25]). Au XIX^{e} siècle, cet inventaire a été complété (Sebastiani, 1815[26]) aboutissant à une flore du Colisée (Deakin, 1855). La flore de ce monument est particulièrement diversifiée. Cette diversité semble être due à la grande variété des structures archéologiques. Ces dernières créent une multitude d'habitats floristiques différents sur ce monument (Caneva *et al.*, 2003).

Ces travaux sont à l'origine du développement d'une écologie urbaine particulière s'intéressant aux sites archéologiques. L'existence de données botaniques anciennes sur le Colisée a permis d'étudier les variations climatiques (Caneva *et al.*, 2005) mais aussi les modifications d'occupation du sol (Caneva *et al.*, 2003). Les changements environnementaux ont aussi été abordés grâce à l'existence de données botaniques anciennes sur le site de la villa des Quintilii (Ceschin *et al.*, 2009). Un programme de recherche d'écologie urbaine sur l'ensemble de la ville a été mis en place (Fanelli *et al.*, 2006 ; Ricotta *et al.*, 2001). Il apparaît que les zones de plus grande richesse spécifique de la ville sont les sites archéologiques et les parcs (Celesti-Grapow *et al.*, 2006).

Une analyse écologique de la flore des sites a été réalisée (Celesti-Grapow *et al.*, 1993). Les espèces observées indiquent que les sites sont un milieu plus chaud, plus sec, et plus ensoleillé que le reste des milieux naturels urbains. Sur les sites, il a aussi été remarqué que la flore indiquait un sol *a priori* moins riche.

Les thermes de Caracalla ont aussi fait l'objet d'un inventaire floristique (Celesti-Grapow & Blasi, 2003). Ce site, d'une superficie limitée comporte tout de même 334 espèces. C'est un des lieux de Rome où la richesse spécifique est la plus élevée. La part d'espèces indigènes est plus forte que dans le reste de la ville bien que ce site se situe à proximité du centre.

[25] Ouvrage non consulté (cité par Caneva *et al.*, 2003).
[26] Ouvrage non consulté (cité par Caneva *et al.*, 2003).

2.2.7 Grèce

L'écologie urbaine s'est aussi développée en Grèce. Les nombreux vestiges antiques des villes grecques ont parfois fait l'objet d'inventaires de végétation. C'est le cas des villes de Thessalonique (Krigas & Kokkini, 2004 ; Krigas *et al.*, 1999) et Patras (Chronopoulos & Christodoulakis, 2000). La dimension archéologique ne semble pas avoir été évoquée comparativement aux travaux des équipes d'écologie urbaine allemandes et italiennes.

2.3 Etudes sur le continent Américain

Dans le nouveau monde, la présence d'une végétation particulière aux sites archéologiques a aussi été observée. Par rapport à l'Europe, de nombreux milieux sont peu perturbés par les usages récents. Cette caractéristique a permis depuis longtemps l'observation d'une végétation singulière sur d'anciens sites d'habitats.

2.3.1 Amas coquilliers

Lors de son voyage en terre de feu en 1832, C. Darwin observe des amas coquilliers liés aux activités de pêche. Ils indiquent la présence de sites d'habitats temporaires. Ces amas peuvent être très conséquents. C. Darwin repère ces amas coquilliers de loin grâce à la couleur de la végétation. Il cite les *wild celery*[27] et les *scurvy grass*[28] comme taxons responsables de cette couleur (Darwin, 1846). Ils poussent systématiquement sur ce type de structures.

En Alaska, sur les îles Aléoutiennes, les sites d'habitats « préhistoriques »[29] sont clairement visibles dans le paysage grâce à cette végétation spécifique aux dépôts coquilliers associés (Dall, 1877 ; Hrdlička, 1937 ; Jochelson, 1925). Le caractère plus dru de cette végétation sur les sites pourrait être dû à un enrichissement du milieu. L'hypothèse de différences végétales liées à la durée d'accumulation a été émise. De 1948 à 1949, T.P. Bank réalise l'étude végétale de ces îles (Bank, 1951) et remarque ce phénomène. Suite à cela, T.P. Bank décide de relever la végétation de quelques-uns de ces sites en effectuant des transects (Bank, 1953). Il remarque des différences de flore en fonction de l'éloignement aux centres de ces sites. Certaines espèces ne sont présentes qu'à une certaine distance de ces sites. Il met en évidence un gradient de pH lié à la distance au centre des sites. La présence d'éléments fertilisants (os, arrêtes…) expliquerait que le pH est plus élevé sur les sites. Ce gradient ainsi que les différences d'élévations et de drainages dues à la présence des structures expliqueraient les différentes formations végétales. T.P. Bank suggère que d'autres gradients minéraux peuvent aussi exister (calcium, phosphore, nitrates…). Il observe que nombre des plantes repérées sur les sites sont des plantes qui auraient pu être utilisées par les Aléoutes et qui auraient persisté.

Des amas coquilliers sont aussi présents en Californie. Certains se retrouvent même assez loin dans les terres. P.I. Meigs y observe une végétation particulière (Meigs, 1938). Parmi les espèces indicatrices, il relève notamment *Franseria chenopodiifolia*. Généralement, cette

[27] Celeri sauvage : *Apium australe* (d'après Porter, 1987).
[28] Herbe à scorbut : *Oxalis enneaphylla* ? (d'après Porter, 1987).
[29] Sites antérieurs à la découverte de ces îles par les Russes au XVII^{e} siècle.

espèce se développe sur les terrasses limoneuses côtières. Aucun usage de cette espèce par les amérindiens à l'origine des amas coquilliers n'est connue. Les graines de cette espèce possèdent des aiguillons. Elles s'accrochent aux pelages des animaux et aux vêtements. Lors de leurs passages à travers les terrasses littorales pour l'exploitation des coquillages, les pêcheurs ont vraisemblablement transporté involontairement ces graines. Cette espèce semble avoir une affinité pour les sols riches. Les graines égarées au niveau des dépotoirs de coquilles auraient ainsi prospérées alors que celles égarées aux alentours n'auraient pas pu se développer faute de substrat adéquat. L'auteur a aussi observé cette plante sur les basses terrasses limoneuses au fond de certains canyons. De la même manière, les amérindiens auraient disséminé involontairement des graines en allant chercher de l'eau. Ces terrasses limoneuses étant propices à cette espèce, celle-ci s'y serait développée. Le milieu environnant, défavorable, n'est quant à lui pas colonisé.

En Colombie Britannique, une étude a été réalisée sur des dépôts coquilliers de différentes périodes (Sawbridge & Bell, 1972). Il a été tenté de corréler la nature de la végétation dominante avec l'âge d'abandon de ces structures. Aucun résultat probant n'est ressorti. D'après cette étude, il n'est donc pas possible de dater la fin d'occupation des sites d'après la végétation. Elle a néanmoins mis en évidence que les teneurs enrichies du sol en calcium, carbone et azote des dépôts s'atténuent avec le temps.

J.K. Small a effectué une exploration botanique en Floride (Small, 1927a, 1927b). Lors de cette exploration, il a inventorié un certain nombre d'amas coquilliers et d'anciens dépotoirs. Leur flore est différente du milieu environnant. L'auteur a aussi réalisé l'inventaire floristique de quelques autres sites comme notamment des *tumuli*. D'après lui, les espèces trouvées sur ces *tumuli* ont eu un rôle économique dans le passé.

2.3.2 Sites paléoesquimaux

Dans le Nunavut (Canada), N.G. McCartney a effectué une étude végétale intéressante de sites d'habitat de culture Thulé (1000 ap. J.-C. à 1600 ap. J.-C.) (McCartney, 1978, 1979)[30]. Sur l'île de Somerset, elle a inventorié les lichens de trois sites (McCartney, 1978). Une cinquantaine d'espèces a été inventoriée dont un certain nombre d'inédites pour l'île. Cette végétation des sites est caractéristique. La flore environnante est nettement différente. Plus au sud, sur l'île de Silumiut, l'auteur a inventorié d'autres sites (McCartney, 1979). Dans cette partie de la côte nord-ouest de la baie d'Hudson, la végétation est plus développée. L'étude a donc porté sur les lichens mais aussi sur les mousses et les herbacées. Des analyses de sols ont aussi été effectuées. Il apparaît que la végétation mais aussi les propriétés physico-chimiques des sols sont perturbées au niveau des sites. La perturbation créée par l'implantation de ces habitats est donc encore clairement visible aujourd'hui.

D'autres études dans cette partie de l'Arctique canadien ont vu depuis le jour. La toundra étant un milieu particulièrement fragile, elle intéresse fortement les botanistes étudiant la biologie des perturbations. Dans l'île d'Igloolik, la végétation de sites de culture Dorset (500 av. J.-C. à 1500 ap. J.-C.) et Thulé a été comparée à une zone témoin non perturbée et à une

[30] Articles issus d'une thèse non consultée : McCartney, 1976.

zone affectée par l'activité continue de mammifères et d'oiseaux. Il est apparu que les occupations anciennes ont un net impact sur la flore et les sols. Cet impact est comparable à celui des zones perturbées par les mammifères et les oiseaux (Derry *et al.*, 1999). D'après l'auteur, les espèces locales ne sont pas capables de réagir aux perturbations. Ces enrichissements du sol les font disparaître. Les sites perturbés peuvent ainsi rester très longtemps avec une flore différente. Les effets de ces occupations anciennes sur les sols sont aussi comparables aux occupations actuelles (Forbes, 1996).

A Terre Neuve (Canada), M.A.P. Renouf et C. Hall ont réalisé des cartes de végétation sur des sites archéologiques de la péninsule de Port-au-Choix. Le premier site analysé est celui de Phillip's Garden (Renouf & Hall, 1985)[31]. Ce site a fait l'objet de sondages (Renouf, 1985). Il est caractéristique de la culture paléoesquimau Dorset. Les anciens bâtiments sont visibles sous forme de légères dépressions. Ces dépressions sont nettement soulignées par la présence d'*Iris versicolor*. Sur le site de Point Riche, occupé *a priori* à la même époque que celui de Phillip's Garden, les auteurs font aussi une observation botanique intéressante (Renouf, 1986 ; Renouf & Hall, 1985)[32]. Le site apparaît clairement dans le paysage. La végétation du site est d'un vert plus sombre qu'ailleurs. Cette différence de couleur est due à la présence d'espèces du genre *Antennaria*. Cette végétation couvre l'ensemble des zones perturbées.

2.3.3 Sites indiens des plaines

En Indiana, sur le site d'Angel Mounds, les agriculteurs locaux ont repéré une ligne de végétation plus claire à travers champs. Les archéologues y ont vu l'emplacement probable du mur d'enceinte d'un ancien village situé sur la rive de l'Ohio. Des sondages ont validé la présence de ce mur. De nombreuses structures sont observables entre ce mur et la rivière. Les structures observables sont des *tumuli* de forme conique et pyramidale tronquée. Ce type de structures est caractéristique de la civilisation Mississipienne. Le site a été occupé environ de 1100 ap. J.-C. à 1450 ap. J.-C.. En 1941 et 1942, H.M. Zeiner réalise l'étude végétale de cette anomalie (Zeiner, 1946)[33]. Outre un inventaire de végétation de la région, elle réalise des relevés de végétation suivant six transects recoupant le mur d'enceinte. Deux transects témoins sont aussi réalisés à l'intérieur de l'enceinte. Le premier est réalisé sur le flanc du plus grand *tumulus*. Le deuxième est réalisé dans la cour à l'intérieur de l'enceinte. Dans tous les transects, l'espèce dominante est *Aster pilosus*. A l'approche du mur d'enceinte, cette espèce disparaît pour la majorité des transects. D'autres espèces voient aussi leur vitalité diminuer comme *Plantago lanceolata* ou *Panicum huachucae*. Au niveau du mur, certaines espèces apparaissent comme *Plantago aristata* et *Dantonia spicata*. Des mesures physico-chimiques des sols montrent qu'à chaque fois, le pH est plus faible à proximité du mur d'enceinte. Sur les deux transects témoins, aucune différence nette de végétation n'apparaît. L'analyse de pH ne montre pas de différences dans ce cas malgré la présence de structures. Dans le transect III, *Aster pilosus* ne disparaît pas totalement mais il voit son développement

[31] Ouvrage. non consulté (cité par Brooks & Johannes, 1990).

[32] Ouvrages. non consultés (cité par Brooks & Johannes, 1990).

[33] Article issu d'une thèse non consultée : Zeiner, 1944 (citée par Black & Johnston, 1962).

réduit. Dans ce transect, le pH est moins faible à l'approche du mur. Il semblerait donc que les différences de végétation soient liées à ce facteur. Afin de vérifier cette hypothèse, l'auteur a réalisé un chaulage sur une bande parallèle au transect I. La vitalité d'*Aster pilosus* s'y est vue accrue. Cette réponse au chaulage *in situ* semble valider l'hypothèse de différences de végétation liées à l'acidité. Suite à cette étude, une prospection magnétique a été réalisée sur le site (Black & Johnston, 1962). Les anomalies magnétiques détectées coïncident avec les anomalies botaniques relevées.

W.L. Jepson, dans son livre sur les arbres de Californie a souligné cet impact de la présence des indiens sur la flore (Jepson, 1909). Certaines essences d'arbres poussent dans des stations discontinues de leurs aires de répartition habituelle. L'auteur remarque que ces stations correspondent à d'anciens villages amérindiens. D'après lui, ces espèces ont été amenées du fait de la comestibilité de leurs graines.

Dans le Nord Dakota, une station de *Pinus flexilis* a pu être observée (Potter & Green, 1964). Pour cette espèce, la station connue la plus proche est à 160 miles dans le Dakota du Sud. Les amérindiens consomment fréquemment les pignons de cette espèce. Les auteurs soupçonnent les amérindiens d'avoir établi un campement dans cette zone et d'avoir introduit, volontairement ou non, cette essence. Il a depuis été montré que la station se situait le long d'un ancien cheminement (Beckes *et al.*, 1982[34]). L'étude des aires de répartition des espèces révèle souvent des stations nettement isolées. La présence de ces stations a dans d'autres cas été expliquée par les déplacements des amérindiens (Gilmore, 1931 ; Moseley, 1931). Day considère ainsi les amérindiens comme un facteur écologique (Day, 1953). A. MacDougall se pose pour sa part des questions sur l'importance de leur rôle dans la migration des plantes durant l'Holocène (MacDougall, 2003).

2.3.4 Sites pueblos

La flore des sites pueblos a aussi attiré plusieurs fois l'attention.

Au Nouveau Mexique, R.A. Yarnell a réalisé un inventaire de la végétation d'environ 200 sites d'habitat Pueblo essentiellement situés sur le plateau de Pajarito (Yarnell, 1965)[35]. Ces sites ont dû être abandonnés avant 1300 ap. J.-C.. L'auteur a intégré à son étude des habitats de plein air de petite taille et de grande taille mais aussi des habitats enterrés. Il a comparé le nombre d'observations de chaque espèce sur chaque type de site à leur fréquence relative dans la région. Certaines espèces de la région sont absentes sur les sites. D'autres espèces sont au contraire anormalement présentes. L'auteur pense que ces espèces ont pu être introduites sur les sites lors de leur occupation. La perturbation du milieu par l'homme a pu les favoriser par rapport aux espèces locales. Il a alors recherché si ces espèces sont liées à la vie des peuples locaux. Un grand nombre de ces espèces sont utilisées actuellement. Elles ont donc pu être utilisées pendant l'occupation des sites. Cette observation renforce l'hypothèse d'anciennes introductions.

Suite à cette étude, A.B. Clark s'est aussi intéressé à la flore des sites pueblos (Clark,

[34] Ouvrage. non consulté (cité par Brooks & Johannes, 1990).

[35] Cet article est issu d'un mémoire de master qui n'a pas pu être consulté.

1968). Son analyse est axée sur des sites de culture Sinagua situés sur le plateau dominant le Walnut Canyon (Flagstaff, Arizona). L'auteur prend en compte trois sites d'habitat occupés de 1000 ap. J.-C. à 1200 ap. J.-C.. R.A. Yarnell a utilisé des critères subjectifs de fréquence des espèces. A.B. Clark ne peut pas reproduire cette méthode sur ses sites. Il décide donc d'utiliser des fréquences numériques. Il réalise alors des lignes permanentes parallèles sur chaque site et sur le témoin. Seuls les arbres, arbustes et cactus sont pris en compte. Cette méthode lui permet de remarquer que la fréquence des espèces varie entre les sites et le témoin. Il met aussi en évidence que la flore varie d'un site à l'autre. La différence de végétation entre sites irait à l'encontre de l'hypothèse de plantes introduites soumises par R.A. Yarnell. Si c'était le cas, les mêmes espèces auraient été introduites sur des habitats contemporains aussi proches. L'auteur pense plutôt que chaque site a créé un habitat particulier. Chaque site verrait donc sa végétation varier en fonction de son emplacement et de sa physionomie.

En Arizona, P.E. Minnis et S.E. Plog ont étudié *Agave parryi* en limite nord de son aire de répartition (Minnis & Plog, 1976). Ils y ont observé que les pieds de cette espèce se retrouvaient au niveau de sites archéologiques. Ces sites sont majoritairement de culture Pueblo. Etant donné la place importante qu'occupe l'Agave pour les peuples locaux et son caractère non rudéral, il semblerait que ces pieds observés soient dus à d'anciennes introductions.

2.3.5 Sites Mayas

Les ruines Mayas ont fasciné beaucoup de chercheurs. Quelques-uns ont remarqué depuis longtemps la présence d'une flore particulière sur ces sites (Thompson, 1930 ; Lundell, 1939 ; Wagner, 1964)[36]. Un arbre, le ramòn (*Brosinum alicastrum*), a fortement attiré l'attention. Cet arbre aurait pu être cultivé anciennement et aurait perduré sur les sites. Des expérimentations ont montré que ses graines, à forte valeur nutritionnelle, avaient un très bon pouvoir de conservation (Puleston, 1971). Suite à ces observations, une étude a été effectuée sur le site de la ville Maya de Cobá au Mexique (Folan *et al.*, 1979). La répartition des espèces de la strate arborée est calquée sur l'organisation du site archéologique. D'après les auteurs, la répartition actuelle des arbres serait due à l'organisation spatiale de plantations datant de l'époque Maya Classique (250 ap. J.-C. à 900 ap. J.-C.). Ces essences auraient été cultivées pour leurs fruits, leurs fibres, leur écorce ou leur résine. Cette explication n'est pas totalement convaincante, certaines espèces sans propriétés particulières poussent aussi préférentiellement sur les sites. Il n'y a, de plus, aucune preuve archéologique de ces plantations. D'après l'étude du site de Lamanai au Belize, il semblerait que la relation entre flore et vestiges soit plutôt d'ordre écologique (Lambert & Arnason, 1982 ; Lambert & Arnason, 1978). La flore du site est similaire à celle d'un affleurement calcaire proche. Le fait que le site soit bâti avec des blocs calcaires serait à l'origine de cette ressemblance. Les différences de flore seraient en fait liées à des différences de matériaux.

[36] Thompson, 1930 et Wagner, 1964 non consultés (cités par Lambert & Arnason, 1982).

2.4 Etudes sur le continent Africain

Des végétaux particuliers ont aussi été remarqués sur des sites archéologiques d'Afrique.

En Haute-Volta, J.-Y. Marchal remarque la coïncidence entre certaines espèces végétales et des habitats désertés au XV^{e} siècle (Marchal, 1978). Quasiment tous ces anciens villages, de culture Dogon, se repèrent dans le paysage par la présence de « parcs » d'acacias (*Faiherbia albida*) associés parfois à d'autres espèces comme les baobabs.

Dans l'Est du Botswana, une campagne de photographie aérienne a mis au jour des anomalies dans la végétation (Denbow, 1979). L'observation au sol a permis de mettre en évidence que ces anomalies sont dues à la présence de *Cenchrus ciliaris*. Ces taches de *Cenchrus ciliaris* se retrouvent systématiquement sur des dépotoirs de l'Age du Fer. Plus d'une centaine de ces dépotoirs a ainsi pu être mise en évidence grâce à cette plante. Cette espèce est aussi observée au niveau d'enclos à bétail abandonnés récemment. Elle pourrait ainsi confirmer l'hypothèse selon laquelle ces dépotoirs aient pu servir d'enclos. La fouille de quelques-unes de ces structures semble aller dans ce sens.

Au Zaïre et en Zambie, *Hausmaniastrum katangense* est réputée pour être inféodée aux sols cuivreux. Cette espèce est qualifiée de cuprophyte ou « copper flower ». Parfois, cette espèce se retrouve dans des zones où aucun minerai de cuivre n'est connu. Il a été remarqué que les stations concernées étaient en réalité d'anciens bas-fourneaux du XIV^{e} siècle (De Plaen *et al.*, 1982 ; Malaisse & Brooks, 1982). La présence de résidus cuivreux dans ces structures expliquerait la présence de cette espèce.

En Afrique du Sud, dans le désert du Karoo, l'altération de la végétation permet de repérer les anciennes occupations Bushmen (Sampson, 1986). Cette dégradation se traduit par un pourcentage de sol nu plus élevé et une modification des communautés végétales. Le taxon le plus caractéristique est *Lycium sp*. Presque 500 campements ont pu être repérés grâce à sa présence. Les espèces récurrentes associées sont typiques des sols dégagés en cours de végétalisation. L'auteur pense donc que les Bushmen ont pu déblayer le sol lors de leur implantation en ces lieux.

2.5 Naissance d'une discipline…mais laquelle ?

2.5.1 Concept d'éco-archéologie

J.-M. Desbordes introduit le terme d'éco-archéologie (Desbordes, 1980). Cependant, il n'en donne pas de définition. Il expose, suite à l'introduction de ce terme, des observations d'espèces végétales particulières sur les sites, mais aussi une multitude d'autres faits différents. Il exprime l'utilité en archéologie des analyses paléoenvironnementales, mais aussi de la datation possible des haies en fonction de leur composition végétale. Il intègrerait donc la paléoécologie dans l'éco-archéologie. Ce terme d'éco-archéologie est étymologiquement très flou. Il signifie archéologie de l'habitat. Mais l'habitat en question est-il l'habitat naturel crée par les vestiges ou l'habitat archéologique ? J.-M. Desbordes parle aussi d'études d'archives. Le lien avec la biologie dans ce cas semble inexistant. Il entendrait donc plus par éco-archéologie, l'archéologie s'occupant des habitats humains ? Cela n'a pas de sens avec le reste de la publication. Ce terme d'éco-archéologie est trop vague. D'ailleurs, il n'a jamais vraiment séduit et n'a guère fait école.

2.5.2 Concepts de phytohistoire et de biohistoire

C. Perrein prône la phytohistoire (Perrein, 1987a, 1987b, 1991a). Malheureusement, il ne définit pas clairement la discipline. Il propose ce terme lors d'une analyse de la flore des haies en fonction de leur âge. On peut donc penser qu'il utilise ce terme dans son sens étymologique. La phytohistoire serait l'utilisation de l'histoire au service de l'étude de la végétation actuelle. Ce terme diffère donc de l'archéobotanique qui est une science paléoenvironnementale et a pour objet d'étude les restes végétaux passés. C. Perrein introduit aussi la notion de technotope : « Le "technotope" pourrait être le concept générique recouvrant les différentes catégories de lieux technicisés » (Perrein, 1987a, 1991a). Le technotope répond donc à l'intégration de l'action de l'homme sur le fonctionnement des biotopes. L'objet d'étude n'est donc plus l'écosystème à proprement dit mais le techno-écosystème.

Suite à cela, C. Perrein introduit en France le terme de biohistoire (Perrein, 1991b). Il entend « par biohistoire une histoire du vivant à l'échelle de l'Homme ». Selon lui, « Archéologues et écologues ont bien sûr un rôle intellectuel de premier plan dans ce programme à venir ; qu'ils s'entendent sur la notion de technotope et la biohistoire sera née! ». Cette définition est un peu floue. Cependant, il est possible de deviner les intentions de l'auteur. La biohistoire serait l'utilisation de l'histoire au service de l'étude des techno-écosystèmes. La biohistoire, étymologiquement, se distingue de la biologie historique. La biologie historique a pour objet d'étude l'histoire naturelle et a donc une approche évolutionniste.

La biohistoire et la phytohistoire seraient-elles donc les disciplines que l'on cherche ici à nommer ? Ces termes peuvent-ils être employés pour l'étude de la végétation de sites préhistoriques ou de sites sans sources écrites ? Ne devrait-on pas dans ce cas parler de phytoarchéologie ?

2.5.3 Concept de phytoarchéologie

En travaillant sur la géobotanique[37] appliquée à la prospection minière, R.R. Brooks et D. Johannes découvrent un fait botanique intéressant. *Alyssum corsicum* (Corbeille d'or de Corse) a été découverte par le botaniste J.E. Duby en 1828. Elle a tout de suite été considérée comme endémique en Corse. Cette espèce affectionne les sols se développant sur serpentine (roches ultramafiques ou ultrabasiques[38]). Elle ne pousse que sur une station de quelques hectares aux alentours de Bastia. Bastia est implantée au niveau du port antique de *Mantinum*. En 1964, T.R. Dudley découvre que cette espèce pousse aussi en Turquie, dans l'Ouest de l'Anatolie. Sa distribution y est nettement plus étendue. Cette région correspond à une zone de forte exploitation céréalière durant l'antiquité. Les sols sont aussi ultramafiques. D'après ces constats, il semblerait qu'*Alyssum corsicum* ait pu être importée accidentellement en Corse avec des céréales. Ce transport a pu être réalisé lors d'échanges commerciaux entre la

[37] Etude des relations de la végétation aux substrats géologiques. Le terme de géobotanique a aussi été utilisé à tord comme synonyme de géographie botanique ou de phytogéographie.

[38] Roche très basique à très faible teneur en silice et forte teneur en magnésium et fer.

Corse et l'Anatolie. Les céréales contenant des graines d'*Allysum* auraient été débarquées au niveau du port de *Mantinum*. *Allysum* aurait été semée en même temps que ces céréales dans les champs environnants. Cette espèce se serait maintenue grâce à la présence de serpentine. D'après Books, ce transport aurait été fait par les Vénètes (Brooks, 1989 ; Brooks, 1998 ; Brooks & Johannes, 1990).

Parallèlement, R.R. Brooks découvre en Afrique avec G. De Plaen et F. Malaisse la présence récurrente d'anciens bas-fourneaux sous *Hausmaniastrum katangense* (De Plaen *et al.*, 1982).

Partant de ces deux observations, R.R. Brooks et D. Johannes découvrent dans la littérature de nombreux autres liens entre la flore et les occupations archéologiques. Ils inventent alors une nouvelle discipline : la phytoarchéologie. Ils la définissent comme l'étude des relations entre la végétation et les occupations archéologiques (Brooks, 1989 ; Brooks, 1998 ; Brooks & Johannes, 1990).

Cette définition est un peu floue. Elle prend aussi bien en compte la végétation passée qu'actuelle comme objets. Cette définition intègre donc l'archéobotanique dans la phytoarchéologie. Dans leur ouvrage, R.R. Brooks et D. Johannes englobent aussi la prospection archéologique aérienne. Or la prospection aérienne est une discipline à part entière. Elle intègre aussi l'étude d'anomalies non botaniques. De plus, si elle intègre en partie la connaissance de l'existence de différences de végétation sur les structures, elle ne s'occupe pas de l'étude de cette flore. Il est donc nécessaire de redéfinir cette discipline. La phytoarchéologie devrait ainsi être considérée comme l'étude des relations entre la nature de la végétation actuelle et les structures archéologiques.

Ce terme de phytoarchéologie semble bien adapté à la problématique de l'étude végétale des sites archéologiques. Nous proposons donc de l'utiliser pour qualifier ce genre d'étude. Cependant, qu'en est-il du lien entre les structures et le reste de l'écosystème ? Cette discipline doit-elle uniquement s'intéresser à la végétation ? Ne devrait-on pas parler alors de bioarchéologie ?

2.5.4 Concept de bioarchéologie

Les termes de bioarchéologie et d'archéo-biologie n'ont jamais été définis clairement. Les disciplines paléoenvironnementales étant très développées, elles ont accaparé les deux termes sans se soucier de leur sens. Etymologiquement, ces deux termes ne signifient pas du tout la même chose. L'archéo-biologie indique l'étude des systèmes biologiques passés. La bioarchéologie étymologiquement devrait être l'étude archéologique des systèmes biologiques actuels. Ce terme n'a toutefois jamais été utilisé en ce sens. Il semble donc nécessaire de redéfinir l'objet de cette discipline. La bioarchéologie devrait ainsi se limiter à l'étude des relations entre la nature des écosystèmes actuels et les structures archéologiques. La phytoarchéologie peut donc ainsi être vue comme une sous-discipline de la bioarchéologie. La bioarchéologie, science entièrement à créer, pourrait aussi s'intéresser aux peuplements animaux ou fongiques actuels des sites archéologiques. Si la végétation des sites archéologiques est si particulière, l'ensemble de l'écosystème est logiquement lui aussi différent.

Nous proposons donc de donner au terme bioarchéologie cette définition. Nous ne pouvons cependant pas savoir si cette définition étymologiquement plus juste arrivera à s'imposer face à l'utilisation actuelle qui est faite de ce terme.

Résumé

L'observation d'une flore particulière sur les sites archéologiques n'est pas un fait nouveau. Depuis le début du XIX^{e} siècle, les chercheurs des sociétés savantes ont remarqué ce phénomène, particulièrement en France. Elles ont motivé certaines équipes actuelles de recherche à s'intéresser au sujet, notamment en Auvergne, en Limousin, en Picardie et en Lorraine. Ces observations ne se limitent toutefois pas à la France. En Europe, de manière générale, les observations de ce type sont assez abondantes dans les pays du Nord de l'Europe et du pourtour de la méditerranée. Ce particularisme européen semble lié à la forte imprégnation de la trace de l'homme dans le paysage. La trace des occupations anciennes dans la végétation a été repérée ailleurs dans le monde, dans des milieux souvent bien préservés des usages actuels. Les exemples proviennent essentiellement du continent américain, mais aussi de quelques cas isolés en Afrique.

L'étude de la flore actuelle poussant sur les sites archéologiques peut être considérée comme une discipline à part entière. Des auteurs ont proposé différents noms à cette discipline. Le terme le plus adapté semble, selon moi, être celui de phytoarchéologie. Dans l'optique d'un élargissement de cette approche à l'étude de l'ensemble des êtres vivants, la notion de bioarchéologie est avancée et redéfinie.

Chapitre 3 Synthèse des modalités possibles de cette présence préférentielle : approche bibliographique par l'exemple du fragon petit houx

Face à toutes ces observations, il est nécessaire de faire un point sur les différentes raisons pouvant expliquer la présence d'une flore particulière au niveau de sites archéologiques.

Cette discussion sera, pour chaque modalité possible, étayée par l'étude bibliographique d'une espèce : le fragon petit houx (*Ruscus aculeatus L.*). Depuis longtemps, le fragon passe pour être un indicateur de sites archéologiques. M. Chassagne signale sa présence au niveau des bosquets entourant certains châteaux en Auvergne (Chassagne, 1957). J.-F. Boyer revient sur les observations de M. Chassagne. Il émet des réserves sur sa valeur indicatrice de sites archéologiques en Limousin. Il propose de discuter du statut de cette plante en fonction des régions (Boyer, 1984a). A. Ghestem considère cette espèce comme potentiellement indicatrice de sites médiévaux en Limousin (Ghestem, 2006). J.-M. Couderc considère le fragon comme une espèce révélatrice notamment de la présence de mortier calcaire (Couderc, 1985). Dans l'Allier, en forêt de Tronçais, L. Humbert remarque une fréquence anormalement élevée de cette espèce dans des relevés réalisés à proximité de *villae* gallo-romaines (Humbert, 2002). Dans notre région, certains archéologues ont remarqué sa présence au niveau de certains sites, notamment de production métallurgique (communications personnelles J.-C. Meuret et J.-B. Vivet). Il a aussi été remarqué la présence de pieds de fragon à l'intérieur de deux dolmens des îles de Bretagne Sud à Saint-Nicolas-des-Glénan (fig. 1) et à Groix (fig. 2) (observations personnelles).

Figure 1 - Imposant pied de fragon présent dans un dolmen ruiné à Saint-Nicolas-des-Glénan (Finistère)

Figure 2 - Imposant pied de fragon présent dans un dolmen ruiné à Groix (Morbihan)

3.1 Plantes introduites

Les plantes poussant préférentiellement sur les sites archéologiques ont pu être introduites par l'homme il y a longtemps. Pour les espèces à longévité élevée, certaines pieds peuvent avoir survécu. Les pieds observés peuvent aussi être les descendants de ces pieds introduits en ces lieux. Ces végétaux seraient ainsi des espèces relictuelles.

3.1.1 Définitions

3.1.1.1 Concept d'espèces introduites et d'espèces directement favorisées

J.-M. Couderc distingue les espèces introduites et les espèces directement favorisées. Les espèces introduites sont des espèces non locales. Elles sont facilement identifiables et leur présence est souvent bien connue des botanistes et historiens. Les espèces directement favorisées par l'homme sont des espèces plantées mais présentes dans la région. Elles sont repérables par leur concentration anormale (Couderc, 1985).

3.1.1.2 Concept de xénophytes ou plantes allochtones

Les espèces considérées comme introduites par J.-M. Couderc sont en dehors de leur aires de répartition. Ces espèces ne sont considérées comme introduites que pour une surface particulière. Il est nécessaire de discuter leur statut pour chaque pays voire pour chaque région. Ces espèces sont considérées comme xénophytes. On les appelle souvent plantes allochtones ou *alien*. Elles sont nommées parfois plantes exotiques, plantes non-natives ou plantes non-indigènes. Elles sont opposables aux espèces dites natives ou autochtones. D'après D.M. Richardson, est défini comme espèce *alien* au sein d'une aire donnée, tout

taxon végétal dont la présence est due à une introduction intentionnelle ou accidentelle en conséquence des activités humaines (Richardson *et al.*, 2000).

La distinction entre plante native et plante allochtone s'établit à partir de données paléobotaniques voire historiques. Les espèces « alien » ne doivent pas présenter d'occurrences dans des analyses paléoenvironnementales antérieures au néolithique (Preston *et al.*, 2004). D'après C.D. Preston, les introductions antérieures à cette période peuvent être négligées. Parmi les disciplines archéobotaniques, seule la carpologie (étude des graines) permet une identification quasi-systématique à l'espèce. La palynologie et l'anthracologie ne permettent cette identification que pour certains taxons. L'anthracologie de plus ne s'intéresse qu'aux ligneux. Il est donc plus fiable d'utiliser la carpologie pour la distinction entre espèce allochtone et autochtone. Les graines étant amenées à voyager moins loin que certains pollens, celles-ci sont donc aussi de meilleurs indicateurs locaux. Les carpologues ont des problématiques avant tout d'ordre archéologique. Ils sont en collaboration directe avec les archéologues de terrain. Les analyses carpologiques sont, en majorité, réalisées à partir de sédiments prélevés sur sites archéologiques. Les espèces identifiées sont en majorité des anthropophiles. L'identification des xénophytes se limite donc à ces espèces. Seules ces espèces sont censées être amenées par l'homme. La discrimination entre espèce native et espèce allochtone est toutefois dure à statuer. C'est le cas des espèces peu courantes présentes naturellement et dont le développement a été favorisé par l'homme. Elles n'ont pas forcément laissé de traces pour les paléoenvironnementalistes aux périodes anciennes et peuvent ainsi être considérées à tort comme allochtones.

3.1.1.3 Introduction intentionnelle ou accidentelle

En introduisant des espèces, l'homme introduit parfois inconsciemment d'autres espèces (Jauzein, 2001a). Ces espèces sont des adventices. On les considère généralement comme mauvaises herbes. Elles sont adaptées aux cultures. Leurs graines sont généralement de taille inférieure à celle des espèces cultivées. Le tri est donc impossible. Les coquelicots et les bleuets des champs de céréales ont sûrement été amenés involontairement lors de l'introduction en Europe des céréales. L'origine de ces espèces est donc commune. Elles auraient été amenées du Proche-Orient lors de la révolution néolithique. Une introduction intentionnelle peut donc entraîner une introduction involontaire. Nombre de ces espèces sont actuellement en raréfaction du fait de l'utilisation massive d'herbicide en agriculture (Jauzein, 2001b).

3.1.1.4 Concept d'archéophytes et de néophytes

Depuis longtemps, les botanistes ont réalisé un découpage des espèces introduites en différentes classes. Dans son ouvrage sur la géographie botanique, A. de Candolle définit qu'il existe cinq types de plantes dans chaque pays (Candolle, 1855). Il distingue ainsi les plantes cultivées, les plantes adventives, les plantes récemment naturalisées, les plantes anciennement naturalisées et les plantes primitives ou aborigènes. Les plantes des quatre premières catégories ont pu être dispersées par l'action volontaire ou inconsciente de

l'homme (Thellung, 1912). A. de Candolle différencie déjà les plantes récemment naturalisées et les plantes naturalisées anciennement.

A. Chatin, lors de son rapport à l'Académie de médecine sur le mémoire de H. Lepage, réalise aussi cette distinction (Chatin, 1861a, 1861b). Selon lui, les besoins sont différents en fonction des périodes. La nature des espèces introduites sur les sites varie donc en fonction des besoins de ces époques. Il met en valeur pour chaque plante les propriétés qui l'intéressent en fonction de l'image caricaturale qu'il a des différentes périodes. Il voit des plantes de « l'époque du moyen âge » aux propriétés excitantes recherchées pour cette « époque guerrière ». Les plantes de « l'époque de la renaissance » ont quant à elles des vertus dépuratives, aphrodisiaques et anti-goutteuses reflet de cette période de « jouissances matérielles ». Les plantes de l'époque moderne n'ont, quant à elles, pas été directement apportées par l'homme. Elles sont liées aux « cultures modernes » et aux « animaux qui le nourrissent et sont sa richesse ». A. Chatin émet aussi l'éventuelle existence d'espèces liées à « l'époque romaine » comme le buis.

A. de Rochebune[39] suit l'hypothèse de A. Chatin (Des Moulins, 1865). Il enrichit le découpage en proposant d'autres périodes. C. Des Moulins critique ce découpage. D'après lui, ces faits d'attribution à une période particulière sont peu fondés. Selon lui, il est nécessaire de poser des limites sinon un jour les flores locales ne contiendront plus qu'un nombre infime d'espèces banales.

Actuellement, on ne tend plus à distinguer au niveau chronologique que les archéophytes et les néophytes. Ces termes auraient été introduits par M. Rickli (Rickli, 1903[40]). Les archéophytes sont les espèces végétales ayant été introduites avant 1500. Les néophytes sont celles ayant été introduites plus tardivement. Ce choix de la date de 1500 correspond à la fin du Moyen Age et au début de la Renaissance.

Le passage du Moyen Age à la Renaissance correspond à la découverte des Amériques. Cet évènement est à l'origine d'une ouverture considérable du nombre d'espèces pouvant être introduites. L'identification des espèces néophytes venant du nouveau monde est en général assez facile. Beaucoup d'espèces ont été amenées et mises en culture dans les jardins d'acclimatation. Il reste souvent des traces écrites de ces introductions. Les espèces néophytes ne viennent pas que des Amériques, de nombreuses espèces sont ramenées à titre décoratif du monde entier. La distinction d'archéophytes au sein de l'ancien monde est souvent plus délicate. Les espèces se sont adaptées et sont totalement intégrées à la flore locale.

Beaucoup de néophytes sont des espèces invasives. Elles posent de nombreux problèmes écologiques. Elles se développent parfois anormalement et entraînent la disparition d'espèces autochtones. Elles sont de ce fait très étudiées. Il apparaît que les néophytes mais aussi les archéophytes ont une écologie différente de la végétation native (Pysek *et al.*, 2005). L'étude de ces archéophytes et néophytes est parfois réalisée sur certains châteaux médiévaux (Dehnen-Schmutz, 1998, 2000, 2001, 2004). L'acclimatation d'espèces étrangères était un

[39] Dans une lettre du 1er juillet 1864 (d'après Des Moulins, 1865).

[40] D'après Preston *et al.*, 2004.

loisir des classes aisées. Les jardins de châteaux ont été des lieux privilégiés d'introduction. Parfois ces espèces s'échappent dans la nature environnante. Les châteaux sont considérés comme des foyers de diffusion de ces espèces.

Malgré ces travaux, il n'existe que peu de synthèses donnant des listes d'espèces. Le programme européen DAISIE[41] ne s'intéresse qu'aux espèces invasives. Une liste d'archéophytes a tout de même été proposée pour les îles britanniques (Preston *et al.*, 2004) ainsi que des listings d'archéophytes et de néophytes pour l'Europe Centrale (Lohmeyer & Sukopp, 1992, 2001[42]).

3.1.1.5 Concept de « stinzenplantzen » ou « plantes castrales »

H.P.M. Hillegers, M.T. Jansen et D.T.E. van der Ploeg introduisent le terme de *Stinzenplantzen* (Hillegers, 1985 ; Jansen & van der Ploeg, 1985)[43]. Ce terme est utilisé pour des plantes poussant dans d'anciens parcs de châteaux. J. Duvigneaud trouve comme équivalent français le terme de « plante castrale » (Duvigneaud, 1991). Ce terme est utilisé pour les espèces considérées comme relictuelles. Ces espèces seraient les témoins vivants de l'introduction humaine ancienne d'une flore particulière en ces lieux.

3.1.1.6 Cas du fragon

Concernant le fragon, M. Chassagne émet sa possible introduction au niveau de certains châteaux en Auvergne (Chassagne, 1957). Pour le Nord de la France, G. Decocq va jusqu'à considérer cette espèce comme une plante castrale (Decocq, 2004). Le fragon est considéré de la même manière en Belgique car il est en dehors de son aire de répartition (Beaujean *et al.*, 1999). Ces auteurs n'abordent pas la question du statut d'archéophyte ou de néophyte du fragon dans ces régions.

3.1.2 Propriétés des plantes motivant cette introduction (concept d'ethnobotanique)

Pour toutes les civilisations et de tous temps, l'homme utilise et a utilisé les plantes. L'ethnobotanique[44] est l'étude des relations actuelles mais aussi passées entre l'homme et les espèces végétales. Cette discipline tend à connaître les différentes propriétés des plantes et les usages qui en sont ou en ont été faits.

Ces usages peuvent être à l'origine d'éventuelles introductions. Celles-ci sont quelquefois volontaires (bouturage, culture…) mais pas nécessairement. Dans de nombreux cas, l'homme peut propager inconsciemment des propagules[45] comme les graines après avoir utilisé une

[41] Delivering Alien Invasive Species Inventories for Europe : http://www.europe-aliens.org/.

[42] Ouvrages non consultés, listing d'espèces disponibles sur internet : http://www2.tu-berlin.de/~oekosys/pdf_dateien/liste_agrio.pdf.

[43] Ouvrages non consultés (cité par Duvigneaud & Saintenoy-Simon, 1993).

[44] La phytoarchéologie a été appelée à tord ethnobotanique par S. Crozat (Crozat, 1999). Suite à son ouvrage, les chercheurs issus du milieu paramédical ont alors parfois assimilé fâcheusement ces deux disciplines.

[45] Se dit d'un organe végétal capable de donner naissance à un nouvel individu après séparation du pied mère.

autre partie de la plante. La présence d'espèces végétales particulières sur les sites archéologiques peut donc être liée à leur exploitation par l'homme. Les différentes propriétés de ces plantes seraient ainsi le moteur de leurs introductions.

Pour ce qui est du fragon, son utilisation par l'homme dans nos régions n'a pas beaucoup laissé de traces pour les périodes anciennes. Aucun reste flagrant n'a été découvert en fouilles terrestres. Toutefois, un texte atteste de son usage ancien. Dans les annexes du cartulaire de l'abbaye de Redon, concernant les anciens usages et coutumes de la forêt de Brécilien (forêt de Paimpont), il est dit que les usagers de Concoret (Morbihan) avaient droit de prendre le *fresgon* dans le quartier de Haute-Forêt (Courson, 1863)[46].

Les archéologues sous-marins ont l'habitude d'observer cette espèce sur les épaves d'époque moderne (communication personnelle E. Veyrat). Sur les épaves A/B et E de Saint-Vaast-la-Hougue (Manche), les restes de fragon sont particulièrement abondants (vaisseaux français incendiés et coulés en 1692 lors de la bataille de la Hougue). Le fragon y est observé sous forme de gerbes parfois ligaturées par une cordelette. Certaines gerbes ont été retrouvées ligaturées entre elles. Le fragon a aussi pu être observé répandu en couches sur le vaigrage[47] de l'épave A/B. D'autres restes de fragon ont pu être observés sur l'épave Natière 1[48] au large de Saint-Malo (Ille-et-Vilaine). Ces découvertes, dans un milieu de conservation exceptionnel des matières organiques, confirment que cette espèce a bien été utilisée dans le passé.

3.1.2.1 Propriétés mécaniques

3.1.2.1.1 Principe

Les propriétés purement « mécaniques » des plantes peuvent être recherchées. Concernant les ligneux, les différences de propriétés mécaniques de leur bois sont à l'origine de choix quant à leur utilisation (Mille, 1993). Leurs usages sont adaptés selon leurs critères de dureté, de résistance, d'aptitude à plier sans casser ou de résistance aux champignons et aux xylophages. D'autres propriétés mécaniques comme la qualité des fibres de certaines herbacées peut aussi être recherchée dans le domaine du textile ou de la cordellerie.

3.1.2.1.2 Cas du fragon

Les tiges du fragon sont rigides mais non cassantes. Cette particularité lui vaut d'être utilisé comme avançons[49] pour la pêche au maquereau sur la côte normande. Il est dans ce cas appelé *vergondier* (Karr, 1860). Cet usage pourrait éventuellement être à l'origine de la découverte des gerbes de fragon lors de fouilles sous-marines.

Ces particularités mécaniques lui ont aussi valu d'être utilisé en Angleterre pour récurer les billots. Cette utilisation semble à l'origine du nom vernaculaire anglais de *butcher's broom*[50]

[46] Le texte original daterait de la fin du XIII^{e} siècle.
[47] Plancher de cale.
[48] Identifiée comme la frégate royale de 300 tonneaux *La Dauphine* ayant coulé en décembre 1704.
[49] Elément de ligne de pêche composé d'une matière résistante que l'on place en bout de ligne avant l'hameçon.
[50] Balai de boucher.

(Moret, 2006). De la même manière, il est employé pour nettoyer les ustensiles de cuisine en Bretagne (Desfontaines, 1809) et les barattes en Vendée (Communications personnelles J.-C. Meuret, A. François). Dans le pays de Rennes, on appèle *haguin* les balais de « houx » servant à récurer les pots de chambre (Le Mière de Corvey, 1824). En Sardaigne, ces balais servent à nettoyer les toiles d'araignées dans les maisons (Atzei, 2003[51]). Un tel usage peut être à l'origine du nom catalan *mata~aranyas*[52] donné au fragon (Conill, 1910). Son utilisation pour la fabrication de balais est aussi attestée dans le Midi de la France (Bory de Saint-Vincent, 1825 ; Orbigny, 1849). Ces usages assez récents décrits surtout au XIX^{e} siècle peuvent avoir des racines plus anciennes.

Par ailleurs, ses piquants acérés sont utilisés pour éloigner les rongeurs nuisibles de la nourriture. En Italie, ceci lui a valu son appellation de *pungi topi* ou *pungitopo*[53] (Mattioli, 1579 ; Moret, 2006). Sûrement dans la lignée de cette tradition, il en est encore suspendu aux plafonds des maisons du Sud de l'Italie malgré l'absence de nourriture (Passalacqua *et al.*, 2006). Cet usage particulier ne semble pas typiquement italien. Le fragon est appelé *épine de rat* en France et (*stechender) mäusedorn*[54] en Allemagne (Moret, 2006) sûrement suite à un usage similaire. Ce coté épineux du fragon peut être à l'origine de plantations au niveau des haies, afin de renforcer l'effet barrière de ces dernières.

3.1.2.2 Propriétés calorifiques

3.1.2.2.1 Principe

A part quelques cas isolés, l'homme a toujours fait du feu à partir de végétaux et notamment de ligneux. Certaines essences ont une aptitude à donner des braises, d'autres des flammes. Les feux lents, ou petits feux, sont caractérisés par un dégagement de chaleur modérée sur la longue durée. Ils sont opposables aux feux produisant beaucoup de flammes et montant haut en température appelés grands feux. Ces derniers necessitent une alimentation en combustible beaucoup plus fréquente (Marguerie & Hunot, 2007). En fonction du type de feu voulu, différentes espèces sont sélectionnées. Certaines espèces comme le chêne sont réputées pour faire de bonnes braises. D'autres espèces comme le châtaigner ont en revanche la mauvaise réputation d'éclater au feu.

3.1.2.2.2 Cas du fragon

Les rameaux du fragon peuvent être utilisés, une fois secs, comme allume feu. Cette pratique a pu être observée notamment dans le Morbihan (Communication personnelle G. Perrin).

Concernant les épaves de Saint-Vaast-la-Hougue (Manche), les archéologues de la

[51] Ouvrage non consulté (cité par Nedelcheva *et al.*, 2007).
[52] Buisson araignée.
[53] Pique souris.
[54] Epine de souris (piquante).

DRASSM[55] ne rejètent pas l'hypothèse de l'utilisation du fragon comme combustible pour incendier volontairement les vaisseaux à la fin de la bataille (communication personnelle E. Veyrat).

3.1.2.3 Propriétés alimentaires

3.1.2.3.1 Principe

Les végétaux sauvages peuvent être utilisés comme aliments. Cela implique une connaissance de la toxicité des espèces. Chez certaines espèces, seuls certains organes ne sont pas toxiques. Leur consommation relève alors de pratiques particulières du point de vue de la cueillette et de la préparation. Parmi les espèces végétales non toxiques, toutes ne sont pas consommées. Le rôle nutritif de ces plantes est le premier facteur recherché. Le choix peut aussi être lié à leur texture, leur goût ou leur parfum. Certaines ne servent ainsi que de condiments.

3.1.2.3.2 Cas du fragon

Dans le cas du fragon, les jeunes pousses, ressemblant à des asperges sauvages, sont comestibles (Mattioli, 1579 ; Tardio *et al.*, 2006). Le fragon est très apprécié dans certaines régions, notamment en Italie. Sa cueillette s'opère d'avril à juin (Pieroni *et al.*, 2005). Celle-ci est parfois soumise à arrêtés préfectoraux. Il fait ainsi partie des espèces dont le prélèvement est réglementé par l'annexe V de la directive européenne « Habitats, Faune, Flore » (92/43/EEC). Des recherches sur sa mise en culture à vocation commerciale ont été réalisées (D'Antuono & Lovato, 2003). Les baies ne peuvent être consommées du fait de leur toxicité (forte teneur en saponines). En revanche, une fois torréfiées, elles perdent leur toxicité. Pour ces raisons, les graines de fragon peuvent servir de succédanés au café. L'infusion de cette mouture passe d'ailleurs comme étant le meilleur succédané du café en termes de proximité de saveurs (Léon, 1864).

3.1.2.4 Propriétés ornementales

3.1.2.4.1 Principe

Sur le site Shanidar en Iraq, des pollens agglomérés, rappelant des anthères, ont pu être remarqués dans une tombe néandertalienne (Leroi-Gourhan, 1975). Ces agglomérats évoquent un dépôt rituel de fleurs accompagnant le défunt. Cela laisse supposer que, déjà au paléolithique, l'homme apprécie la dimension esthétique des fleurs.

Les plantes ornementent aussi les lieux de vie. Afin de les égayer, il est d'usage de planter des végétaux dans les jardins. Cette pratique ancienne est connue au moins depuis l'antiquité. Elle semble plus ancienne encore et a donné naissance à des jardins mythiques. Les jardins suspendus de Babylone et le jardin d'Eden en sont les exemples les plus frappants. Les espèces plantées dans les jardins d'ornement font l'objet d'un choix. Les grosses fleurs de

[55] Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-marines.

couleurs vives sont généralement les premières concernées par ces démarches. Pour les arbres et arbustes, les choix se portent principalement sur l'aptitude à la taille, la capacité de multiplication végétative et la persistance du feuillage.

3.1.2.4.2 Cas du fragon

Le fragon n'a pas échappé à ces plantations horticoles. Sa sempervirence en a fait une espèce préconisée pour l'ornement des bosquets d'hiver (Desfontaines, 1809). Le contraste des baies rouges avec le feuillage vert foncé est fort apprécié. Sa multiplication est conseillée par division et transplantation des rhizomes[56] (Collectif, 1803 ; Desfontaines, 1809).

3.1.2.5 Propriétés médicinales

3.1.2.5.1 Principe

De nombreuses espèces végétales ont des propriétés médicinales. Tyler fait remarquer que les espèces trouvées à Shanidar ont des propriétés médicinales. Il suppose que la connaissance de ces propriétés existait déjà dès le paléolithique (Tyler, 2000). Il a fallu attendre l'arrivée de l'écriture pour avoir la première preuve manifeste de l'utilisation médicinale des plantes. Des écrits cunéiformes de l'époque mésopotamienne relatent ainsi les modes de préparation d'huiles et d'onguents aux propriétés médicinales (Newman *et al.*, 2000). De nombreuses préparations de plantes sont relevées dans le célèbre papyrus Ebers (Ebers, 1875[57]). Les sources écrites confirment que la médecine se base depuis longtemps sur les végétaux. Durant l'Antiquité, Théophraste, Dioscorides et Galien ont souligné le rôle des plantes en médecine. L'ouvrage de Dioscorides, « *de materia medica* », a fait l'objet de nombreuses reproductions et traductions qui sont parvenues jusqu'aux périodes actuelles. Cet ouvrage est toujours une référence en médecine. Notre pharmacopée est essentiellement basée sur les végétaux. Même si la phytothérapie est une discipline en déclin[58], de nombreux médicaments sont produits à partir d'extraits de plantes. Concernant les médicaments de synthèse, les principes actifs sont quasiment toujours des dérivés de molécules initialement trouvées dans des végétaux. Ces végétaux médicinaux ont souvent fait l'objet de plantations notamment à l'époque médiévale dans les monastères (jardins des simples[59] ou *Herbularius*)[60]. De tels jardins sont fréquemment recréés sur certaines reconstitutions de sites archéologiques.

3.1.2.5.2 Cas du fragon

Concernant le fragon, le rhizome a des vertus circulatoires connues au moins depuis l'Antiquité. Il entre dans la liste des espèces de la pharmacopée antique citées par Dioscorides dans « Sur la matière médicale » (repris par Mattioli, 1579). Le fragon est aussi préconisé par Columelle pour soigner le bétail (Nisard, 1864). Il est actuellement utilisé dans la composition

[56] Appelés stolons dans l'ouvrage.
[57] Ouvrage non consulté.
[58] Diplôme supprimé sous le régime de Vichy.
[59] On appelait les plantes médicinales simples car on pensait qu'elles contenaient une substance active unique.
[60] La médecine était à l'époque affaire de religieux.

de nombreux médicaments. Ses principes actifs que sont les ruscogénines font l'objet de très nombreuses publications dans le domaine paramédical.

3.1.2.6 Propriétés symboliques

3.1.2.6.1 Principe

Beaucoup de végétaux ont une valeur symbolique et notamment les arbres. Dans la tradition chrétienne, le paradis est un jardin : Eden. Ce jardin est dominé par deux arbres : l'arbre de la vie et l'arbre de la connaissance du bien et du mal. Certains arbres ont des symboliques liées à leurs propriétés médicinales. Par exemple, la toxicité de l'if lui a valu une symbolique de mort alors que la sempervirence de son feuillage représente la vie (Domont & Montelle, 2003). Cette dualité fait de l'if un arbre de justice. Il a donné son nom à Saint-Yves patron des avocats. Pour P. Charles-Lavauzelle, la plantation d'un if permettait parfois de marquer un contrat (Charles-Lavauzelle, 2000). La symbolique de justice devant dieu lui a valu sa plantation autour de beaucoup d'églises ou de lieu de cultes. De vieux ifs creux, ne pouvant être datés par dendrologie, sont qualifiés d'arbres millénaires. Leur plantation est souvent attribuée à la période d'édification du lieu de culte à proximité mais ceci reste à nuancer. Ces plantations sont tellement nombreuses qu'il est difficile de distinguer les ifs introduits des ifs en position naturelle (Thomas & Polwart, 2003). Dans la mythologie gréco-romaine, certaines espèces végétales sont liées à un dieu particulier. En voulant échapper à Apollon, Daphnée se transforme en laurier. Afin de garder ce souvenir, Apollon porte depuis un rameau de laurier. D'autres espèces sont aussi l'attribut d'un dieu comme la rose pour Vénus ou la vigne pour Bacchus (Folkard, 1884). Les religions ne sont pas les seules à donner une valeur symbolique aux plantes. Le laurier est utilisé pour la couronne des vainqueurs. Ceci a même donné naissance aux termes français de lauréat ou de baccalauréat. Notre quotidien est marqué par nombre de symboles végétaux. La fleur de lys symbolise la monarchie. Le rameau d'olivier représente la paix, l'épi de blé l'abondance et la feuille de chêne la force.

3.1.2.6.2 Cas du fragon

Le fragon lui aussi semble avoir une forte valeur symbolique. En Angleterre, il est appelé *jew's myrtle*[61]. Ce nom vernaculaire puiserait son origine de traditions populaires où la couronne d'épine du Christ serait composée de rameaux de fragon (Brewer, 1898). Les cousins du fragon *Ruscus hypophyllum* et *Ruscus hypoglossum* sont appelés lauriers alexandrins (Miller, 1735). Ces lauriers alexandrins auraient servi comme le laurier à l'élaboration des couronnes de triomphateurs et de poètes. La couronne de César serait d'ailleurs en laurier alexandrin (Folkard, 1884). Le rapprochement des genres *Ruscus* et *Laurus* est assez ancré. Pline utiliserai le terme *laurus taxa* et Théophraste *laurus alexandrina* pour désigner le genre *Ruscus* (Cuvier, 1822). *Danae racemosa* autrefois appelé *Ruscus racemosus* est aussi appelé *laurus alexandrina* (Collectif, 1803). Il serait donc potentiellement

[61] Myrte des juifs.

l'objet des mêmes usages. J. Pinkerton dit que les couronnes ornant les monnaies semblent incontestablement faites avec *laurus alexandrina* (Pinkerton, 1784). Toutes ces espèces du genre se ressemblent. L'analogie des usages en temps que couronne de triomphateur ou d'épines ne peut pas être fortuite. Il serait possible de soumettre que *Ruscus aculeatus* ait servi à l'élaboration de la couronne du christ comme le propose E.C. Brewer. Ayant des épines, cette espèce représente la souffrance du Christ. Cette espèce faisant partie du genre *Ruscus* est apparentée aux couronnes traditionnelles des rois faites avec les autres espèces non piquantes. Le Christ se retrouve ainsi roi et martyr. Cette association du fragon avec le Christ pourrait éventuellement être à l'origine des noms de *cirerer de Betlem*[62] ou *cirerer del bon pastor*[63] attribués au fragon en catalan ou *azoutacristos*[64] en gallicien (López González, 2002).

Cette symbolique peut être à l'origine de l'utilisation du fragon lors de cérémonies religieuses.

Le fragon servirait notamment dans la tradition juive lors de la fête des tabernacles (Folkard, 1884). Cette fête, appelée aussi fête des moissons ou fête des cabanes célèbre la fin de l'exode. Elle correspond à la fin des dernières récoltes.

En Irlande, des gerbes de fragon à grappes *Danae racemosa* (L.) ont pu être observées à l'entrée d'une église protestante à Galway (observation personnelle). Cette observation est singulière dans la mesure où cette espèce n'est normalement pas présente en Irlande.

En France, le fragon est localement utilisé lors de mariages dans les landes Bordelaises. Le sol est balayé par un parent de la mariée avant le passage du cortège à l'aide d'un balai de fragon. A la fin de la fête, cette personne chasse les convives à l'aide dudit balai enflammé (Nore, 1864).

Il semble que le petit houx soit parfois utilisé lors de la fête des Rameaux au même titre que le buis, le houx ou encore le laurier (Knapp *et al.*, 1908). Leurs rameaux verdoyants toute l'année sont signes de vitalité et sont, pour ces raisons, déposés sur les tombes de proches où exposés sur les crucifix à l'intérieur des maisons. L'utilisation du fragon pour cette cérémonie peut être à l'origine des noms de *buis pointu*, de *faux buis* ou de *prickly box*[65] et *box holly*[66] en Angleterre (Moret, 2006).

A Noël, le fragon peut être associé au houx et au sapin, pour les mêmes raisons de persistance (communication personnelle S. Bourdin). Il est notamment utilisé pour les décorations de la table. Il est aussi traditionnellement utilisé pour décorer une bûche de bois mort. Cette bûche est mise dans le foyer le soir de Noël (Ricard, 1955). Le fragon, de par son feuillage et ses fruits d'hiver, redonne ainsi symboliquement vie au bois mort. Cet emploi spécifique à la période de Noël est peut-être à l'origine du nom de la variété horticole

[62] Cerisier de Bethléem.
[63] Cerisier du bon berger.
[64] Fouet (?) du christ.
[65] Buis piquant.
[66] Buis houx.

Christmas berry[67], mais aussi des noms attribués en Espagne vus précédemment.

Le fragon apparaît aussi lié à la sorcellerie. D'après B. Duhourcau, le fragon est la plante préférée des sorcières : elles s'y roulaient lors de leur initiation. Il avance que le mot *brouche* désignant les sorcières dans les Pyrénées vient de *bruscum*, l'ancien nom latin du fragon (Duhourcau, 1985). De la même manière, le mot *bruja* utilisé en catalan pour désigner les sorcières viendrait de *bruscus* dérivé de *Ruscus* (Cazalbou, 2001). Outre ces rites initiatiques légendaires, le fragon a pu être utilisé par les « sorcières » pour ses propriétés médicinales. En effet les « sorcières » avaient une très bonne connaissance de la pharmacopée naturelle. Il semble d'ailleurs qu'elles étaient craintes pour cette raison. La connaissance des propriétés médecinales des plantes était en effet normalement réservée aux religieux. Comme il a été dit précédemment, le fragon sert à la confection des balais. Il est possible d'y voir aussi un autre rapprochement entre la sorcellerie et cette espèce.

Il semble donc que les espèces sempervirentes comme le fragon soient utilisées aux deux fêtes, qu'elles soient religieuses ou « païennes », marquant l'entrée et la sortie de l'hiver. Ces plantes vertes l'hiver sont vouées à un culte de la vie éternelle. Cette symbolique peut être une des raisons de la présence du fragon sur des sites à caractère cultuel ou religieux. Il est notamment présent, en fourrés extrêmement denses, à l'emplacement d'une ancienne chapelle et de son cimetière à Comblessac (Ille-et-Vilaine). Ce site indiqué sur le cadastre napoléonien n'est actuellement discernable que par cette présence du fragon en association avec de très vieux ifs (observation personnelle).

3.2 Plantes favorisées

Les espèces végétales observées préférentiellement au niveau des sites n'ont pas forcément été introduites. Elles ont tout simplement pu être présentes auparavant et avoir été favorisées par les activités humaines passées.

3.2.1 Sélection humaine

3.2.1.1 Principe

Lors de l'entretien des terres, l'homme coupe, arrache ou brûle des végétaux encombrants. Certaines espèces sont volontairement épargnées du fait de leurs propriétés. Cet entretien est donc différentiel. Dans les haies, les arbres sont laissés ainsi que certains arbustes. Les ronces et autres espèces envahissantes sont en revanche enlevées. Les fruitiers sauvages sont souvent épargnés et font parfois l'objet de porte-greffes. L'homme modèle ainsi la nature même sans introduire d'espèces.

3.2.1.2 Cas du fragon

Dans les haies, le fragon peut faire partie de ces espèces favorisées. Son caractère épineux est favorable au cloisonnement du bétail. Compte tenu de sa croissance lente, il est laissé en

[67] Baie de Noël.

place contrairement aux ronces qui envahissent la haie ainsi que les parcelles attenantes.

3.2.2 Vecteurs de dissémination liés aux occupations humaines (concept d'espèces commensales de l'homme)

L'homme n'est pas le seul disperseur des végétaux. Chaque espèce a son propre moyen de dispersion. Cette dispersion peut faire appel aux éléments naturels comme le vent. Dans d'autres cas, les plantes sont dispersées par les animaux. Certaines ont développé des fruits dont les graines sont ingérées et excrétées plus loin. D'autres produisent des graines à crochets capables de s'agripper aux pelages ou aux plumages.

3.2.2.1 Principe

Certaines espèces ont un développement favorisé par la présence d'une autre espèce. Parmi ces espèces, P.J. van Beneden distingue le parasitisme, le commensalisme et le mutualisme (Van Beneden, 1878) en fonction de l'impact sur l'autre espèce. Dans le cas du parasitisme, l'espèce hôte en tire une nuisance. Dans le cas du mutualisme (ou symbiose), les deux espèces en tirent parti. Dans le cas du commensalisme, l'hôte n'est affecté d'aucune manière. L'homme de par ses activités attire une multitude de commensaux voire de parasites. Les deux grands groupes d'espèces animales commensales de l'homme sont les passereaux et les micro-mammifères. Ceux-ci profitent notamment de la production agricole de graines. Ces espèces ont une répartition spatiale liée aux implantations humaines. Elles peuvent, de par leurs activités, disséminer certaines espèces végétales. Cette dissémination passée peut avoir modelé le paysage en créant une flore particulière au niveau des sites archéologiques.

3.2.2.2 Cas du fragon

Le fragon produit des baies. La diffusion des graines ne semble se faire que par gravité (Kay & Page, 1985). Les graines tombent directement au sol (espèce barochore). La toxicité des baies (Rameau *et al.*, 1989) pourrait appuyer ce mode de diffusion unique. Cependant, la toxicité pour l'homme n'est pas forcément applicable à l'ensemble du règne animal. Ainsi, du fait de son mode de fructification en baies charnues, cette plante est souvent considérée comme endozoochore[68]. Certains pensent notamment que les oiseaux contribuent à la dissémination des graines (Herrera, 1982, 1984 ; Parent, 2002). Aucune espèce n'est pointée en particulier. D'ailleurs, aucune graine n'a jamais été observée dans les fèces (Herrera, 1984). Le diamètre des baies est sans doute trop important pour la plupart des petites espèces aviaires. Les turdidés (merles et grives) sembleraient ainsi les mieux placés comme disperseurs potentiels. Cette famille d'oiseaux comporte de nombreux commensaux de l'homme. Cependant, au cours d'un suivi régulier sur sept ans d'une population de fragon, aucun phénomène de prédation des baies n'a été remarqué (Hillman, 1979 ; Hillman & Warren, 1973). Par conséquent, les baies peuvent rester accrochées aux cladodes[69] des mois durant. E.M. Hillman pense qu'au regard de la possible origine méditerranéenne du fragon,

[68] Se dit d'une espèce dont les graines sont dispersées par des animaux après transit intestinal.

[69] Tiges aplaties ressemblant à des feuilles.

l'agent disperseur n'est pas forcément présent en Grande-Bretagne où a été effectué le suivi. Outre l'avifaune, sur les îles d'Hyères, certains contenus stomacaux de rats noirs *Rattus rattus* ont révélé la présence de graines de *Ruscus* (Cassaing *et al.*, 2005). Toujours au vu de la taille des baies et du milieu, des micromammifères comme le muscardin pourraient aussi être envisagés comme vecteurs de dissémination. Il faudrait toutefois vérifier cette hypothèse d'endozoochorie, la seule donnée fiable étant celle de J. Cassaing. Il est intéressant de noter que le rat est justement une espèce commensale de l'homme. La présence de *Ruscus* sur des sites d'occupations humaines anciennes pourrait ainsi être éventuellement expliquée par l'anthropicité des espèces vectrices.

3.2.3 Favorisation par la modification de l'environnement

La dispersion des espèces végétales par l'homme ou par des animaux n'est pas la seule explication possible d'une flore particulière sur les sites. L'homme modifie durablement l'environnement. Cette modification de l'environnement peut induire une modification de la flore locale.

3.2.3.1 Résistance des espèces à la modification de l'environnement (concept d'écologie des perturbations)

3.2.3.1.1 Principe de perturbations

L'impact de perturbations sur la structure et la dynamique des communautés végétales est perçu depuis longtemps par les botanistes (Cooper, 1926). Pendant longtemps, seuls les évènements catastrophiques ont été perçus comme des perturbations (White, 1979). Toutefois, il existe des perturbations plus discrètes. Leur impact n'est pas homogène sur les différentes espèces végétales. Certaines espèces peuvent disparaître. Ceci peut être favorable à d'autres qui vont prendre la place laissée vacante[70] (Denslow, 1980 ; Watt, 1947).

Il faut attendre les années 80 pour voir apparaître une définition écologique de la perturbation. D'après S.T.A. Pickett et P.S. White, une perturbation est un événement discret dans le temps qui désorganise les écosystèmes, les communautés ou les populations en modifiant les ressources, leur accessibilité ou l'environnement physique (Pickett & White, 1985). Les perturbations peuvent se manifester à de multiples échelles (Pickett *et al.*, 1989).

D'après J.H. Connell, les perturbations, si elles sont modérées peuvent créer de la diversité (Connel, 1978). Dans un milieu perturbé modérément, les espèces de milieux stables côtoient les espèces de milieux perturbés.

3.2.3.1.2 Stratégies d'adaptation aux perturbations

Les espèces se sont adaptées aux perturbations en créant des organes de réserves. La perturbation passée, la plante se développe à partir de bourgeons. En fonction des perturbations, les espèces végétales les ont développés à un emplacement spécifique de la plante. En fonction de l'emplacement de ces bourgeons, il est possible de différencier

[70] Appelée « gap ».

différents types biologiques. C. Raunkiaer a établi une classification de ces types biologiques (Raunkiær, 1904, 1905, 1907, 1908)[71]. Pour le milieu terrestre, il distingue les individus qui meurent et stockent leurs réserves dans des graines (thérophytes). Il remarque ensuite que chez certaines espèces, seules les parties aériennes meurent. Dans ce cas, les réserves sont alors accumulées dans des bulbes, des tubercules ou des rhizomes (géophytes : cryptophytes terrestres). Pour d'autres espèces, seule une partie des organes aériens meurt. L'énergie est alors amassée dans des bourgeons aériens. Chez certaines espèces, les bourgeons sont au niveau de la surface du sol. Ce sont des plantes prostrées (hémicryptophytes). D'autres espèces sont ligneuses et ont des bourgeons réellement aériens. C. Raunkiaer distingue les espèces ligneuses basses (chamaephytes) des espèces ligneuses arborescentes (phanérophytes). Contrairement aux phanérophytes, les chamaephytes (hauteur inférieure à 50 centimètres) peuvent être protégés l'hiver des froids extrêmes par la couche de neige. Pour les phanérophytes, C. Raunkiaer distingue plusieurs sous-types en fonction de leur hauteur (hauteur inférieure à 2 mètres : nanophanérophytes, de 2 à 8 mètres : microphanérophytes, de 8 à 30 mètres : mésophanérophytes, supérieure à 30 mètres : mégaphanérophytes). Ces types biologiques ont fait l'objet des bases de données *Plantatt* (Hill *et al.*, 2004)[72] et *Ecoflora* (Fitter & Peat, 1994)[73].

Les espèces s'adaptent aussi à leur environnement en développant différentes stratégies reproductives. Chaque population s'accroît naturellement mais est limitée par les ressources du milieu (Malthus, 1798a, 1798b). La courbe de croissance d'une population suit ainsi une courbe logistique (Verhulst, 1838). Cette courbe est définie par un facteur d'accroissement *r* et une capacité limite du milieu *K*. Il a été montré que certaines espèces s'adaptent aux perturbations du milieu en favorisant un accroissement rapide de la population au détriment de la survie des individus. Ce sont les espèces de stratégie **r**. D'autres espèces vont au contraire essayer de maintenir en vie la population existante quitte à avoir une natalité très basse pour éviter à la population de s'accroître au-delà du nombre d'individu limite que le milieu peut contenir. Ce sont les espèces de stratégie **K**. Entre ces deux extrêmes, il existe tout un continuum (MacArthur & Wilson, 1967 ; Pianka, 1970)[74].

Selon J.P. Grime, (Grime, 1974, 1977, 1979)[75] il existe deux types de facteurs limitant la production de biomasse des plantes. Le stress entraîne une réduction de la production de la biomasse végétale. La perturbation entraîne quant à elle une destruction totale ou partielle de la biomasse existante. Les plantes développent différentes stratégies face à ces deux types de facteurs. Lors de l'absence de ces facteurs, la stratégie des plantes est la compétitivité (**C**). En cas de stress extrême, les espèces développent la stratégie de résistance au stress (**S**). Lors de perturbations extrêmes, les espèces adoptent la stratégie de la rudéralité (**R**). Aucune stratégie

[71] Articles et ouvrage non consultés (cité par Smith, 1913).
[72] Base disponible sur http://www.brc.ac.uk/downloads/PLANTATT_5_Dec_06.zip.
[73] Base bibliographique consultable sur http://www.ecoflora.co.uk/ (intègre la base Plantatt).
[74] MacArthur & Wilson, 1967 non consulté (cité par Pianka, 1970).
[75] Grime, 1974 non consulté (cité par Hodgson *et al.*, 1999).

n'est viable en cas de perturbation et de stress extrêmes. Entre les trois cas extrêmes, chaque espèce trouve un compromis. Les comportements de chaque espèce sont élaborés à partir de leurs modes de vie. Les espèces ayant une forte compétitivité (**C**) développent par exemple des stolons ou des rhizomes traçants. Ces organes leur permettent d'occuper rapidement du terrain face à d'éventuels compétiteurs. Cette stratégie est un intermédiaire entre les stratégies **r** et **K**. Les espèces caractérisées par une bonne résistance au stress (**S**) vont développer des ports en rosettes ou des organes de réserves souterrains. Le mode de port des organes aériens leur permet notamment de résister au vent, au piétinement... Les organes de réserves souterrains leurs permettent de survivre pendant les périodes néfastes. Cette stratégie est équivalente à la stratégie **K**. Les espèces considérées comme rudérales (**R**) développent quant à elles des cycles de vie très courts et produisent beaucoup de graines. Cette production de nombreux descendants au détriment de la longévité des individus permet la survie de l'espèce. Dans le cas de labours annuels par exemple, cette stratégie est la seule qui permette la survie d'une espèce. Cette stratégie est à rapprocher de la stratégie **r**. Les indices **CSR** de Grime font l'objet d'une base de donnée publiée (Hodgson *et al.*, 1999)[76].

M. Westoby revient sur les travaux de J.P. Grime (Westoby, 1998). Selon lui, le modèle **CSR** de J.P. Grime a la faiblesse de nier qu'il puisse exister des espèces résistantes à la fois à des valeurs extrêmes de stress et de perturbation. Ce modèle a aussi la faiblesse d'être basé sur des concepts difficilement mesurables. Il propose alors le modèle **LHS** (leaf-heigth-seed). Celui-ci est directement lié à la morphologie de la plante. Chaque espèce alloue différemment son énergie en termes de croissance verticale, de surface foliaire et production de graines.

Une étude récente a permis de mettre en évidence que le modèle **LHS** semble plus pertinent pour mettre en évidence l'impact de certaines perturbations comme le pâturage ou le paillage (Moog *et al.*, 2005).

Concernant les perturbations humaines, la rudéralité est un bon indicateur mais elle n'est pas spécifique de ces perturbations. En Allemagne, il a été proposé de développer la notion d'hémérobie (Jalas, 1955). L'hémérobie est le degré d'anthropisation de la flore. Malheureusement, cette valeur est subjective. Plus récemment au Royaume Uni, il a été proposé d'utiliser le degré d'urbanisation pour répondre à la demande d'indices d'hémérobie (Hill *et al.*, 2002). Ces indices n'ont pas encore été publiés. Toutefois M.O. Hill m'a cordialement fait parvenir cette base de données. Pour chaque espèce, les indices d'urbanité sont développés ainsi que des indices d'annualité (proportion moyenne d'espèces annuelles associées) et des indices de néophytie (proportion moyenne d'espèces néophytes associées).

3.2.3.1.3 Cas du fragon

Le fragon ne fait pas partie des espèces de la base de données d'hémérobie de Hill mais apparaît dans la base **CSR** de Grime. D'après J.P. Grime, le fragon a un comportement à mi-

[76] Cet article montre comment calculer les indices de Grime. Les méthodes de calcul et la base de données sont disponibles sur : http://www.people.ex.ac.uk/rh203/allocating_csr.html.

chemin entre espèce compétitive et espèce stress-tolérante (**SC**).

Le fragon a en effet développé la stratégie de résistance au stress. Il est capable de résister à la dégradation de ses parties aériennes. En cas de destruction totale des parties aériennes, il est capable de se régénérer à partir de ses rhizomes. La base *Plantatt* le décrit comme un nanophanérophyte. Ses organes aériens étant intégralement lignifiés, il est donc aussi capable de résister à cette dégradation des parties aériennes. De plus, les cladodes sont munies d'un aiguillon terminal. Il est donc dissuasif pour les grands herbivores.

Le fragon a aussi une stratégie de compétitivité. Il se multiplie aisément de manière végétative. Les bosquets ainsi créés captent toute la lumière. Il est de ce fait très rare de voir d'autres espèces sous des pieds de fragon.

Le fragon est donc adapté à certaines perturbations humaines. La présence de ces perturbations peut le favoriser indirectement en éliminant les espèces concurrentes. Il peut résister au broutage du bétail et se régénérer facilement après une coupe. Cette résistance peut être à la base d'une observation plus fréquente en forêts pâturées (Onaindia *et al.*, 2004). C'est donc une espèce pouvant facilement tolérer la présence de l'homme. Par rapport à d'autres espèces moins tolérantes, le fragon a ainsi pu être sélectionné involontairement par les activités humaines. Sa bonne compétitivité vis à vis d'autres espèces peut lui permettre de survivre dans des milieux perturbés.

Toutefois cette résistance est à relativiser. Ainsi, le fragon semble plus fréquent dans les zones non concernées par des débardages forestiers (Deconchat & Balent, 2001).

3.2.3.2 Adaptation des espèces au nouvel environnement

De par ses activités, l'homme modifie le milieu. Il modifie notamment la physico-chimie des sols. Ces modifications des sols peuvent persister très longtemps. Elles touchent en particulier le phosphore (Arrhenius, 1929 ; Craddock *et al.*, 1985 ; Solecki, 1951)[77]. Les concentrations d'autres éléments sont aussi bouleversées par la présence humaine (Entwistle & Abrahams, 1997 ; Konrad *et al.*, 1983 ; Linderholm & Lundberg, 1994). L'ensemble de ces modifications entraîne la création de conditions particulières sur les sites archéologiques. Ces conditions sont différentes du milieu environnant le site. Chaque espèce végétale vit dans un habitat particulier. Certaines espèces trouvent cet habitat sur le site et d'autres en dehors. La végétation du site se retrouve ainsi différente du milieu environnant. L'écologie des différentes espèces peut dicter leur répartition entre les zones perturbées par les sites et les zones non perturbées.

3.2.3.2.1 Concept d'écologie d'une espèce

Les plantes sont constituées d'éléments minéraux (Saussure, 1804). Elles ont donc besoin de ces éléments pour vivre. Si un seul est absent dans le milieu, elles ne peuvent pas pousser (Liebig, 1840). La notion d'écologie comme la science de l'habitat, c'est-à-dire l'étude des conditions d'existence des êtres vivants et de leurs relations avec le milieu, voit ainsi le jour

[77] Arrhenius, 1931 non consulté (cité par Craddock *et al.*, 1985).

(Haeckel, 1866). C. Schröter et O. Kirchner distinguent, au sein de l'écologie, la synécologie de l'autécologie (Schröter & Kirchner, 1896, 1902). L'autécologie étudie les relations d'une espèce à son milieu alors que la synécologie s'intéresse aux communautés dans leur ensemble et aux liens qu'elles entretiennent avec leur milieu.

3.2.3.2.2 Concept de niche écologique potentielle

En réalité, les espèces végétales ne suivent pas la loi du minimum de Liebig mais obéissent à une loi de tolérance (Shelford, 1913). Chaque espèce ne peut survivre qu'entre une valeur minimum et une valeur maximum pour chaque facteur du milieu. Cette zone de tolérance est appelée amplitude écologique. Chaque espèce possède aussi un optimum de croissance pour une valeur donnée de ce facteur. Cette loi de tolérance mise en évidence a permis de faire apparaître la notion de niche écologique (Elton, 1927 ; Grinnell, 1917). Chaque espèce vit dans un ensemble de conditions environnementales propre à elle. M.P. Austin différencie les gradients écologiques ayant une influence directe sur les organismes comme les concentrations en nutriments du sol et les gradients écologiques indirects comme l'altitude (Austin, 1980). Les affinités pour chaque gradient environnemental définissent ainsi la niche potentielle d'une espèce.

3.2.3.2.3 Influence de la compétition interspécifique

Des espèces avec des besoins identiques ne peuvent coexister (Gause, 1932). Une niche écologique ne peut donc être occupée que par une espèce. En dehors de sa niche, une espèce se retrouve non compétitive face aux autres espèces. Elle ne peut donc pas se développer. C'est le principe de l'exclusion compétitive (Hardin, 1960). La compétition a lieu vis à vis des ressources, c'est à dire des facteurs écologiques. Une ressource est consommée par l'espèce considérée. L'augmentation de sa disponibilité dans le milieu entraîne une augmentation de croissance. Ces ressources peuvent être essentielles, interchangeables, complémentaires ou antagonistes (Tilman, 1988).

3.2.3.2.4 Concept de niche écologique réalisée

La compétition avec d'autres espèces ne permet donc pas à une espèce d'occuper toute sa niche potentielle (Hutchinson, 1957). Chaque individu réalise des compromis entre la disponibilité des ressources et la compétition avec d'autres individus. Ces compromis de stratégies dans la survie d'un individu ont fait l'objet de la théorie de l'« Optimal Foraging » (MacArthur & Pianka, 1966). Plus un individu réalise de bons compromis, plus il a de chance de survivre et d'assurer une descendance. Ce degré de vitalité est appelé *fitness* (Levins, 1968). La vitalité d'un individu est fonction de son histoire de vie, de toutes les interactions avec son environnement qu'il a eu depuis sa naissance. La niche réalisée relève donc de la synécologie et non de l'autécologie. Pour étudier la niche potentielle, il est donc nécessaire d'étudier les espèces dans leur milieu. La niche réalisée est aussi fonction du hasard de dispersion. La communauté végétale est le résultat des affinités autécologiques et du hasard de la dispersion (Gleason, 1917).

3.2.3.2.5 Concept de partage temporel de niche écologique

L'exclusion compétitive ne permet pas à différentes espèces de cohabiter dans la même niche. Certaines espèces peuvent toutefois partager une même niche spatiale. Elles vivent dans un habitat mais avec des cycles décalés. Ceci peut avoir un rôle majeur sur les cycles biologiques des végétaux. Lors de la pollinisation notamment, les espèces végétales entrent en compétition vis à vis des pollinisateurs (Waser, 1978). Si deux espèces fleurissent en même temps, un pollinisateur aura de grandes chances de transporter les deux types de pollens. Les chances de pollinisation se voient amoindries. Avec la sélection naturelle, les cycles de ces deux espèces finissent par se décaler. Chaque espèce a ainsi plus de chance d'être pollinisée.

3.2.3.2.6 Valeurs indicatrices

Chaque espèce vit dans une niche particulière. Pour chaque espèce, il est possible de décrire ce milieu de vie. Pour définir la niche réalisée, il faut étudier les espèces dans leur milieu naturel. Le milieu de vie des espèces peut être étudié de deux façons.

- **Valeurs indicatrices qualitatives**

Le milieu peut faire l'objet d'une évaluation qualitative. Cette méthode repose sur la connaissance préalable des milieux.

H. Ellenberg a étudié les comportements synécologiques des espèces d'Europe Centrale de cette manière (Ellenberg *et al.*, 1992). Les comportements des espèces sont analysés en fonction de paramètres édaphiques comme la richesse, le pH, l'humidité et la salinité du sol. L'ouverture du milieu et le degré de continentalité sont aussi étudiés. La réponse des espèces est abordée via des indices. Ces indices notent l'optimum des espèces pour ces facteurs. Aucune indication sur l'amplitude des espèces autour de cet optimum n'est fournie. Récemment, ces valeurs ont été adaptées à la flore des Iles Britanniques (Hill *et al.*, 2004). Des indices ont aussi été attribués aux espèces britanniques non présentes en Europe Centrale.

La flore forestière française a aussi fait l'objet d'une évaluation qualitative des niches (Rameau *et al.*, 1989). La niche réalisée des espèces a été estimée suivant les gradients trophiques et hydriques des sols. Le type d'humus et l'humidité des sols ont servi à établir ces comportements. Les amplitudes de répartition des différentes espèces sur ces deux facteurs sont représentées approximativement sur des diagrammes. La lecture des diagrammes permet d'estimer les comportements de ces espèces vis à vis des deux gradients (fig. 3). Malheureusement, ces comportements n'étant pas synthétisés numériquement, ils ne sont pas vraiment utilisables statistiquement.

- **Valeurs indicatrices quantitatives**

Le milieu peut aussi faire l'objet d'une évaluation quantitative. Cette méthode repose sur la mesure de certaines propriétés des milieux. Ces études sont plus précises. Elles demandent toutefois plus de moyens. Il est nécessaire de réaliser un grand nombre de mesures pour chaque propriété de milieu prise en compte.

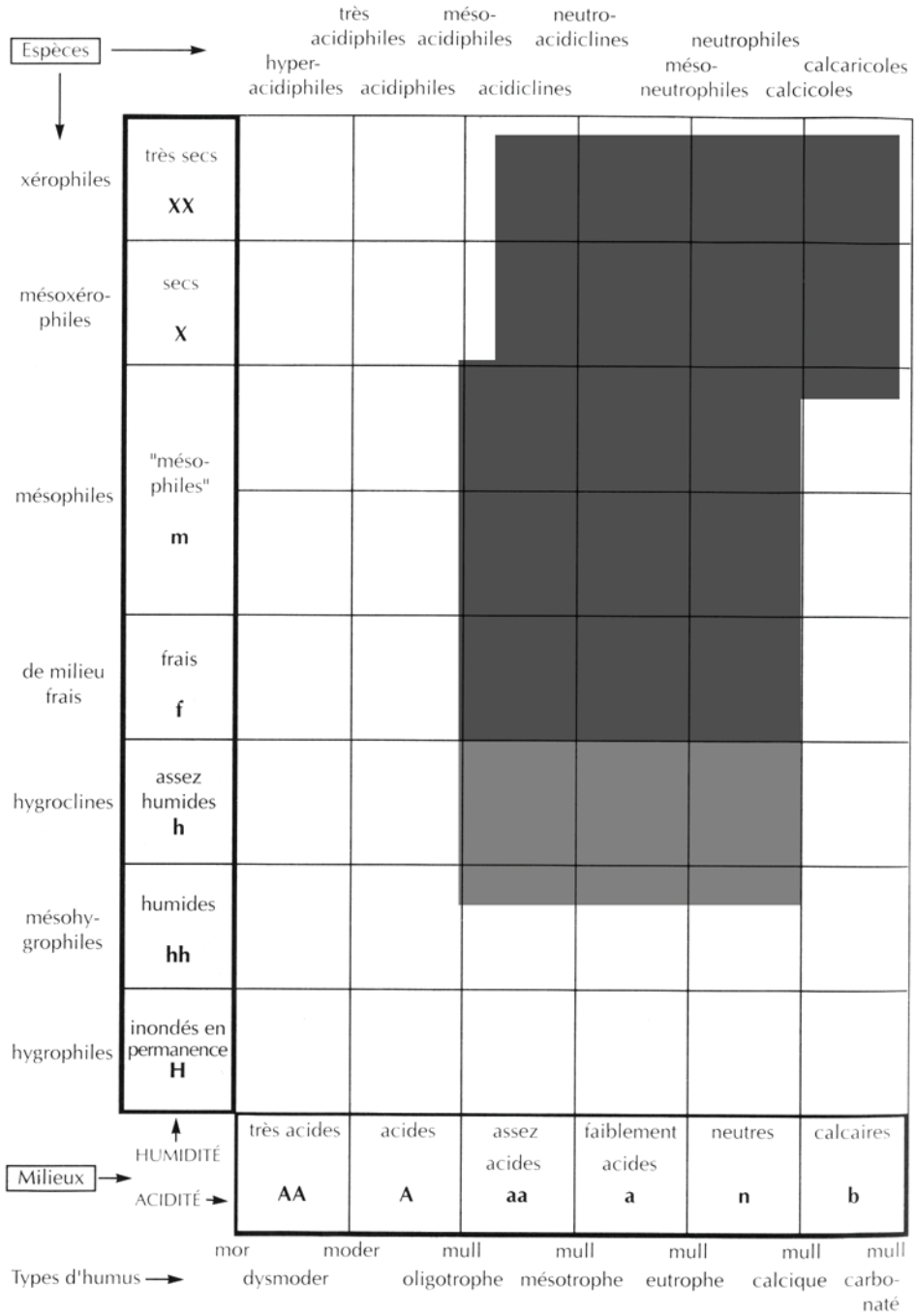


Figure 3 - Diagramme utilisé pour la représentation des caractères trophiques et hydriques de la flore forestière française (d'après Rameau *et al.*, 1989 : exemple du fragon)

Ce type d'étude a été réalisé sur la flore forestière française. Une étude poussée sur la végétation forestière des Vosges a tout d'abord été réalisée (Gégout, 1995). Les comportements des espèces sont étudiés vis-à-vis de facteurs mesurés du sol. La modélisation de présence de ces espèces vis-à-vis de ces facteurs permet de faire ressortir les optima. Les minima et les maxima sont aussi extraits. L'avantage d'utiliser des valeurs réelles et non des indices est de pouvoir caractériser de manière plus fiable la niche écologique de ces espèces. Une étude plus récente vient compléter cette étude sur les Vosges. La même démarche a été

appliquée à l'ensemble des forêts françaises. De plus, les facteurs climatiques ont aussi été pris en compte (Coudun, 2005). L'étude étant de grande ampleur, elle est restée au state d'étude de cas pour une espèce. Une synthèse a enfin été effectuée sur l'ensemble des espèces observables dans les forêts françaises (Gégout, 2006). Pour chaque espèce, un optimum est attribué pour chaque variable dans le cas d'espèces non ubiquistes. L'amplitude écologique autour de cet optimum est aussi donnée. Cette valeur permet de distinguer pour un facteur du milieu les espèces ayant une niche écologique large (espèces euryèces) des espèces ayant une niche écologique très stricte (espèces sténoèces).

3.2.3.2.7 Cas du fragon

L'écologie du fragon au niveau des Iles Britanniques a été abordée par des indices (Hill *et al.*, 2004). Ils définissent le fragon comme une espèce d'ombre à demi-ombre (**L**=4). Cette espèce affectionne selon eux plutôt des sols frais (**F**=5), acides à modérément acides (**R**=4) et non fertiles à moyennement fertiles (**N**=4). Ils qualifient le fragon comme espèce absente sur sols salés (**S**=0). Il faut émettre des réserves sur ces indices. En Bretagne, il n'est pas rare de rencontrer cette espèce sur le littoral en sommet de micro-falaises sur sols *a priori* assez riches et salés ou succeptibles de recevoir des embruns.

Pour les forêts françaises, des optima écologiques ont été calculés pour le fragon (Gégout, 2006). Le pH optimal du fragon est de 6.2. Il est plutôt neutrophile. Le fragon pousse préférentiellement sur des sols saturés en bases (S/T optimal : 100%). C'est une espèce de sols ayant de bonnes réserves minérales. Le rapport carbone/azote de l'humus optimal est de 13. C'est un rapport assez faible. Le fragon préfère donc les humus à minéralisation rapide. Ce caractère va dans le même sens que les deux caractères précédents. Pour les températures, le fragon pousse préférentiellement dans des endroits assez chauds (température moyenne annuelle optimale : 13.3°C) et où les hivers ne sont pas rigoureux (température minimale optimale : 3.2°C). C'est clairement une espèce thermophile. Etant une espèce thermophile, elle fuit naturellement les climats trop montagnards et trop continentaux. En France, son aire de répartition est à dominante atlantique et méditerranéenne. Ces habitats peu élevés font que l'altitude optimale du fragon est de 0. Le bilan hydrique de juillet optimum du fragon est clairement négatif (-114mm). Cette caractéristique va dans le sens d'une thermophile mais aussi d'une xérophile. Son évapotranspiration optimale est très élevée (170mm pour les mois de mars à mai). Cette observation va aussi dans le sens d'une espèce plutôt xérophile. Ces caractéristiques peuvent être à l'origine de sa présence accrue au niveau de trouées récentes dans une vieille futaie de *Quercus ilex* L. en Corse (Panaïotis *et al.*, 1998).

Le fragon peut donc trouver un milieu favorable sur les sites. Un sol enrichi, à humus doux et à minéralisation rapide lui semble favorable. Ce type de sol est souvent présent sur les sites du fait de l'accumulation de matériaux riches en bases comme de la chaux. De la même manière, le fragon semble préférer les lieux chauds et secs. Cette caractéristique se retrouve facilement sur les vestiges notamment sur l'emplacement d'anciens murs.

3.3 Plantes reflétant un stade dynamique différent

Les anomalies observées dans la végétation peuvent aussi être liées à des stades dynamiques de la végétation différents. Les sites présentent souvent une flore de milieux plus fermés.

3.3.1 Concept de successions végétales et de climax

Lors de son étude de la végétation des dunes du lac Michigan, H.C. Cowles a remarqué que la végétation était différente en fonction de la date de mise en place de ces dunes (Cowles, 1899a, 1899b, 1899c, 1899d). La végétation n'est pas figée. Elle évolue dans le temps. Les espèces se succèdent. Certaines espèces apparaissent et d'autres disparaissent. Il a ainsi mis en évidence le concept de successions végétales. Au cours de ces successions, le milieu se ferme. Au bout d'un certain temps, la forêt apparaît. A ce stade, les successions s'arrêtent. La composition de la végétation n'évolue plus. Ce stade dynamique ultime est appelé climax[78] (Clements, 1916, 1936)[79]. Le climax est donc le stade ultime vers lequel tend naturellement la végétation. Des perturbations peuvent rompre les successions et entretenir artificiellement un type d'association végétale (Watt, 1947). On parle alors d'association paraclimacique. D'autres perturbations détruisent les milieux climaciques. Dans ce cas, la végétation reprend ses droits et suit à nouveau la loi des successions végétales.

3.3.2 Vitesse de colonisation des espèces

Les espèces apparaissent à différents moments au cours des successions. Ce phénomène est en particulier lié à des différences de capacité de colonisation. Les premières espèces à apparaître sont les espèces pionnières. Elles ont de grandes facilités de colonisation. Elles produisent beaucoup de descendants. Ce sont des espèces de stratégie **r**. Les espèces des stades climaciques sont au contraire peu dispendieuses en graines. Elles favorisent la survie des individus. Ce sont des espèces de stratégie **K** (Cf. 3.2.3.1.2).

Généralement les modes de dissémination sont aussi différents. Les espèces pionnières sont capables de disséminer leurs graines à longues distances. Ces graines sont souvent disséminées par un agent extérieur. Les espèces climaciques n'ont pas d'intérêt à distribuer leurs graines à longue distance. Elles doivent entretenir la population locale. Beaucoup de ces espèces n'ont ainsi pas développé de mécanismes de dispersion des graines. Certaines tombent tout simplement au sol. Ce sont des barochores.

En fonction des modes de production et de dispersion des graines, chaque espèce à une vitesse de colonisation différente. Les espèces se dispersant le mieux sont celles dont les graines sont ingérées par des animaux (endozoochores). Ensuite, viennent les espèces dont les graines s'agrippent aux animaux (épizoochores). Les espèces dont les graines sont dispersées par le vent (anémochores) migrent en général moins bien. Ce phénomène peut être dû à de nombreux échecs de germination dans des milieux colonisés non appropriés. Contrairement

[78] Ce terme a été utilisé préalablement par Cooper, 1913a, 1913b, 1913c.

[79] Clements, 1916 non consulté.

aux animaux, le vent disperse effectivement les graines au hasard. Les espèces dont les graines sont dispersées par les fourmis (myrmécochores) sont naturellement moins bonnes colonisatrices. Bien sûr, celle n'ayant pas développé de mécanismes de dispersion (barochores) se disséminent très mal (Matlack, 1994)[80].

L'étude botanique de parcelles forestière d'âge connu permet de mesurer ces vitesses de colonisation des différentes espèces (Bossuyt *et al.*, 1999 ; Brunet & Von Oheimb, 1998).

3.3.3 Enrichissement du milieu au cours des successions

Les successions végétales peuvent s'opérer suivant trois modèles différents (Connel & Slatyer, 1977). Les espèces présentes peuvent inhiber, tolérer ou faciliter l'implantation de nouvelles espèces. Les successions se font donc par modification de l'environnement. Cette modification de l'environnement a conduit D. Tilman à introduire la thèse du « ressource ratio hypothesis » (Tilman, 1985). Selon lui, le milieu s'enrichit au fil du temps. Ce phénomène est lié à l'accumulation de matière organique dans les sols. Le milieu est en perpétuel changement. De nouvelles niches écologiques apparaissent tandis que d'autres disparaissent. Les espèces de milieux pauvres et ouverts laissent petit à petit la place à des espèces de milieux riches et fermés.

3.3.4 Saut dans les successions en fonction de l'état initial

D'après la thèse du « ressource-ratio hypothesis » (Tilman, 1985), l'état initial a une forte importance sur la nature de la végétation à s'installer lors de successions végétales secondaires. Dans un milieu sans végétation, la richesse du sol joue un rôle sur la nature de la flore qui s'implante. Dans un milieu riche, la végétation à s'installer sera celle d'une succession végétale plus avancée. Le milieu se fermera donc plus rapidement. Il y a donc un saut des successions végétales les plus pionnières. Ce fait a pu être observé lors de cycles forestiers successifs (Rackham, 1980). La végétation à reprendre après un cycle est plus avancée que celle du cycle précédent.

3.3.5 Cas du fragon

C. Perrein voit dans cette espèce un indicateur d'ancienneté des haies de Vendée (Perrein, 1984, 1986, 1987a, 1987b, 1991a). Il a repéré que *Ruscus aculeatus* ne poussait qu'au niveau de haies anciennes. Sa quasi-absence des haies postérieures à l'époque napoléonienne a pu être remarquée. Sur un chemin recalibré en 1862, l'auteur n'a observé des pieds de fragon que sur les talus non remodelés (Perrein, 1984, 1987a, 1991a). Il considère que *Ruscus aculeatus* devait être présent sur l'ensemble du tracé avant cette date. L'espèce n'aurait ainsi pas eu le temps de coloniser les nouveaux talus créés. Quelques pieds isolés ont quand même commencé la recolonisation, mais pas à plus de 10 mètres des « zones refuges ». Il pense que son mode de reproduction essentiellement végétatif, à diffusion lente, est à l'origine de son absence sur les haies récentes. Les fleurs mâles et femelles de cette plante sont généralement sur des pieds différents (Kay & Page, 1985). La morphologie des fleurs fait penser à une

[80] Tous ces types de dispersion sont consignés dans les bases de données *Plantatt* et *Ecoflora*..

pollinisation par les insectes. Cependant, sur son terrain de suivi près de Londres, Q.O.N. Kay n'a pas observé le moindre insecte s'intéresser à ces fleurs. Finalement, les pieds de Grande-Bretagne semblent pollinisés par le vent. Dans les populations naturelles, et notamment celles de faible taille, de nombreux échecs de pollinisation ont ainsi pu être observés. La diffusion des graines ne semble se faire que par gravité (Kay & Page, 1985). La toxicité des baies (Rameau *et al.*, 1989) peut confirmer ce mode de diffusion unique. Toutes ces caractéristiques semblent appuyer l'hypothèse d'une espèce indicatrice d'ancienneté des milieux. Le fragon peut donc être considéré comme une espèce indicatrice de forêts anciennes (Hermy *et al.*, 1999 ; Rackham, 1980 ; Rose, 1999)[81].

Dans le cas où le fragon aurait été introduit, cette mauvaise capacité de colonisation peut expliquer que le fragon n'a pas pu s'implanter à distance des sites. Il est possible de considérer que pour le fragon, les sites sont un milieu plus ancien d'un point de vue de sa présence. Il a pu s'y développer mais n'a pas eu le temps d'aller coloniser l'environnement autour de ces sites.

Sa présence préférentielle sur les sites forestiers peut aussi être expliquée par une fermeture précoce du milieu au niveau de ceux-ci après leur abandon. Cette fermeture précoce est souvent visible au niveau de bâtiments abandonnés récemment. L'étude de la végétation que j'ai réalisée en forêt de Haye lors de mon DEA va dans le même sens. Il a été clairement montré que la végétation est plus sciaphile[82] au niveau des structures archéologiques antiques par rapport au reste de la forêt (Lemouland, 2002). Cette fermeture précoce du milieu au niveau des structures peut être liée à l'hypothèse de ressource-ratio de D. Tilman. Les sols ont pu être enrichis au niveau des sites (Cf. 3.2.3.2). Cet enrichissement peut être à l'origine d'un stade dynamique plus avancé. Le fragon, présent dans l'environnement proche, trouve alors sur les vestiges un stade dynamique avancé plus favorable. Il y voit son développement favorisé.

Les labours épargnent généralement les ruines. Dans ces cas là, la végétation colonise les vestiges mais pas les parcelles attenantes. Les ruines présentent alors un stade dynamique végétal plus avancé. Ceci peut favoriser la présence d'espèces de forêts anciennes comme le fragon.

Résumé

Les différentes modalités pouvant être à l'origine de la présence d'une flore particulière sur les sites archéologiques ont été recherchées à travers une étude bibliographique des concepts clés d'écologie. Ce phénomène peut tout d'abord être dû à l'introduction d'espèces au niveau des sites. Cette introduction peut être intentionnelle ou accidentelle. Lors d'un choix délibéré, les espèces sont sélectionnées suivant leurs propriétés. La recherche de qualités mécaniques, calorifiques, alimentaires, ornementales, médicinales ou symboliques particulières peut être à l'origine de ce choix d'espèces particulières. Les espèces poussant sur les sites ont ensuite pu

[81] Rose, 1999 non consulté (d'après McCollin *et al.*, 2000).

[82] Se dit d'une végétation de milieu ombragé.

être favorisées par les activités humaines passées. L'homme sélectionne les espèces qu'il veut ou ne veut pas laisser pousser. Il attire tout un lot d'espèces animales autour de lui. Il modifie son environnement physique. Toutes ces perturbations peuvent avoir entraîné la croissance d'une flore adaptée sur les sites. Enfin, les différences de flore observées peuvent être dues à des différences d'âge de la végétation. Le site a pu être abandonné à une période différente des parcelles attenantes. Cette différence d'âge peut aussi être artificielle. La flore peut être anormalement vieillie ou rajeunie. La dynamique d'évolution de la flore peut être différente entre les sites et l'environnement immédiat. Ces différences sont souvent liées aux modes de dispersion des espèces. Un milieu riche se verra aussi colonisé par une flore d'un stade dynamique avancé.

Le fragon *Ruscus aculeatus* L. est une espèce considérée par de nombreux auteurs comme une espèce poussant préférentiellement sur les vestiges archéologiques. L'étude bibliographique de son écologie montre que toutes les modalités précédemment avancées sont envisageables pour expliquer sa présence actuelle au niveau des zones d'occupation archéologique. L'étude de ce cas particulier permet de concevoir que la présence d'espèces particulières sur les structures peut être le produit de ces multiples phénomènes.

Chapitre 4 Choix des sites d'étude

Il a été vu, à travers l'étude bibliographique, que de multiples causes peuvent expliquer la présence d'une flore particulière au niveau des occupations anciennes. Pour analyser les causes déterminantes, il est nécessaire de réaliser des études phytoarchéologiques de sites.

4.1 Modalités de choix

Pour ce genre d'étude, le choix préalable des zones à étudier est essentiel. L'interdisciplinarité de l'étude nécessite d'intégrer à la fois les contraintes liées à l'analyse des sites archéologiques et celles liées à l'étude de la végétation.

4.1.1 Contraintes archéologiques

4.1.1.1 Site connu

Il est préférable d'étudier des sites archéologiques attestés.

Ceci permet d'éviter de dépenser des efforts inutiles sur des études fines de végétation et de sol longues à mettre en œuvre. Les diagnostics en archéologie préventive sur de grandes surfaces vierges de tous vestiges connus ne peuvent donc pas faire l'objet de ce genre d'études.

L'ensemble des sites connus est répertorié à la carte archéologique des SRA (Services Régionaux d'Archéologie) au niveau de la base de données Patriarche. Chacun de ces sites possède un numéro unique d'entité archéologique (EA). Beaucoup des sites découverts anciennement sont mal localisés. Il est ainsi nécessaire de ne s'appuyer que sur les sites bien localisés.

4.1.1.2 Site susceptible d'avoir modifié la végétation

4.1.1.2.1 Sites « majeurs »

En archéologie, la notion de site est très vague. A la carte archéologique, de nombreux points ne désignent que des objets isolés découverts de manière fortuite. Ceux-ci ne peuvent pas être considérés comme pouvant avoir une influence sur la végétation. De la même manière, les bornes, les stèles et tout site très ponctuel ne peut avoir qu'un impact mineur sur la végétation. Seuls les sites « majeurs », ayant eu des chances de modifier la végétation peuvent être pris en compte.

4.1.1.2.2 Sites peu enfouis

Parfois les sites sont recouverts par une forte épaisseur sédimentaire. La végétation répond essentiellement aux niveaux supérieurs du sol. Une couverture sédimentaire (alluvions, colluvions…) masque donc les sites au regard de la réaction des espèces végétales. Les sites établis en fonds de vallées, bas de versants ou scellés par des dunes sur le littoral ne doivent donc pas être retenus par l'étude.

4.1.1.2.3 Sites « récents »

Les activités humaines se sont intensifiées au fil du temps avec l'évolution des techniques.

Cette intensification a aussi bien touché la modification des sols que l'importation d'espèces. La néolithisation est une période charnière au niveau de ces deux pratiques. Cette période se traduit par la sédentarisation de l'homme et le développement de l'agriculture. La sédentarisation a augmenté l'impact des habitats sur le milieu du fait de leur permanence temporelle. La révolution agraire a quant à elle entraîné de grands changements au niveau de la diffusion des plantes et de l'usage des sols. Les vestiges antérieurs à cette période n'ont ainsi que peu de chances de modifier de manière durable la végétation. Pour les périodes les plus anciennes, la dernière glaciation a en plus créé un phénomène d'extinction d'espèces et a érodé les paléosols anté-holocènes. Les sites antérieurs au Néolithique sont donc déconseillés pour ce genre d'étude.

4.1.1.3 Etude prévue

La multiplicité des usages humains passés a créé une grande diversité de structures. Cette variabilité des structures est bien connue des archéologues. Les différences sont liées à des divergences structurelles et fonctionnelles. Cette hétérogénéité archéologique n'a pour l'instant jamais été vraiment prise en compte par les écologues réalisant ce genre d'études. Les sites ont toujours été abordés comme des points ou des entités homogènes. Au mieux, une interprétation succincte d'anomalies microtopographiques a été réalisée (Dupouey *et al.*, 2002 ; Lemouland, 2002).

Cette variabilité spatiale risque d'avoir un impact différentiel sur la végétation. Il est ainsi essentiel d'effectuer des études archéologiques de ces sites. C'est en effet la seule manière d'intégrer cette hétérogénéité. La meilleure méthode est de s'appuyer sur des sites dont l'étude archéologique est prévue. Les études de végétation et les prélèvements de sols doivent donc se réaliser en amont.

4.1.1.4 Milieu naturel approprié

Si les sites peuvent modifier le milieu, le milieu peut également avoir un impact sur la découverte de sites. Les prospections classiques (pédestre, aérienne) sont surtout efficaces en milieux labourés. La majorité des sites connus se situe donc dans ces milieux ou dans le monde urbain. Les milieux semi-naturels sont fortement délaissés par les prospections. La présente étude doit à long terme aider à palier ce manque de découvertes. En ne s'intéressant qu'aux milieux semi-naturels, nous sommes confrontés à cette carence. Le nombre de sites où l'étude est envisageable est ainsi réduit.

4.1.2 Contraintes botaniques

4.1.2.1 Concept d'aire minimale

Pour chaque milieu, au-delà d'une certaine surface échantillonnée, le nombre d'espèces répertoriées n'évolue quasiment plus. Cette surface est appelée aire minimale et définit la taille minimale des relevés de végétation à effectuer pour un échantillonnage représentatif (Cain, 1938).

Pour la mesurer, il suffit de réaliser, au sein d'un milieu homogène, un inventaire des espèces présentes. Le relevé est initialement réalisé sur une petite surface. Il ne comptabilise

ainsi qu'une faible portion des espèces présentes. La surface du relevé est alors doublée afin d'inventorier de nouvelles espèces. Cette opération de multiplication de la surface de relevé par deux est répétée un grand nombre de fois.

Il est alors possible de représenter graphiquement le nombre d'espèces en fonction de la surface échantillonnée. Cette courbe suit une loi logarithmique :

$$N = a \times \ln(S) + b$$

où N est le nombre d'espèces inventoriées,
S la surface inventoriée,
et a et b les coefficients de corrélation.

Il est possible de déterminer un point d'inflexion de la courbe précédant un plateau. Ce point d'inflexion est le point à partir duquel le nombre d'espèces augmente de moins de 10% en augmentant la surface de 10% (Cain, 1938 ; Cannone, 2004). Cette surface correspond à la valeur numérique du coefficient de corrélation a. Ce point d'inflexion sur la courbe correspond à l'aire minimale d'un relevé. En deçà de ce point d'inflexion, un relevé ne captera pas la majorité des espèces du milieu. Au-delà, il faut considérablement augmenter la surface du relevé pour capter une nouvelle espèce. La durée d'échantillonnage des espèces d'un relevé étant proportionnelle à sa surface, le coût temporel pour trouver une nouvelle espèce est donc très élevé. Il est ainsi préférable de réaliser des relevés sur une surface proche de l'aire minimale. De plus, plus un relevé est grand, plus il risque de capter des espèces d'autres milieux. L'aire minimale est donc un compromis entre homogénéité (capter le maximum d'espèces du milieu) et fiabilité (éviter de capter les espèces d'autres milieux). Le mode de calcul de cette aire minimale est très controversé (Cannone, 2004 ; Gounot, 1969), mais il est essentiel de définir une surface de relevé prenant en compte cette dualité homogénéité-fiabilité.

4.1.2.2 Facteur de variation de l'aire minimale

La compétition vis-à-vis de la lumière varie en fonction de la fermeture des milieux. La multiplicité des strates diminue la probabilité pour la lumière d'arriver au sol. Le pourcentage de sol nu au niveau de la strate herbacée augmente alors. Pour capter l'ensemble des espèces d'un milieu, l'échantillonnage doit être réalisé sur une surface plus grande. L'aire minimale des milieux fermés est donc nettement supérieure à celle des milieux ouverts. Pour exemple, elle est de l'ordre du m² en milieu prairial et de l'ordre de la centaine de m² en milieu forestier.

4.1.2.3 Choix des milieux en fonction de l'échelle d'étude

Pour une analyse de la végétation vis-à-vis des structures archéologiques, il est nécessaire de faire coïncider les deux échelles d'analyse. Au niveau archéologique, l'organisation en plan des structures est généralement complexe. Cette forte hétérogénéité des structures induit une étude à une échelle fine. L'analyse archéologique se situe ainsi généralement aux alentours du m² voire en deçà.

Les milieux naturels correspondant à cette échelle sont donc les milieux où la strate herbacée est très recouvrante, c'est-à-dire les milieux ouverts à semi-ouverts. Pour ces milieux, au sein de chaque relevé, il est ainsi possible de dire que les conditions archéologiques sont à peu près homogènes. Au sein de chaque relevé, l'hétérogénéité archéologique peut donc être négligée.

Les milieux forestiers ne sont en revanche pas adaptés à une étude par relevés classiques de la végétation. Un relevé en milieu forestier est en effet trop vaste pour négliger l'hétérogénéité archéologique intra-relevé. Dans ce genre de milieu, pour faire coïncider les deux échelles d'étude, il est nécessaire d'étudier la végétation de manière différente. La meilleure méthode est d'abandonner les relevés sur l'ensemble de la végétation et de se concentrer sur la réponse locale d'une espèce en faisant sa cartographie. Les espèces les plus simples à cartographier sont les ligneux en relevant l'emplacement des différents pieds. Si cette méthode est efficace à l'échelle d'une espèce, elle supprime toutefois toute réflexion globale sur la végétation. Elle est facilement applicable aux ligneux des haies et des forêts.

4.2 Problèmes rencontrés

Comme toujours, la recherche de sites adaptés à un protocole d'étude est beaucoup moins aisée qu'il n'y parait. Certains problèmes peuvent survenir. Quelques exemples parmi les multiples sites visités illustreront les difficultés rencontrées.

4.2.1 Délais d'études inadaptés

L'inconvénient majeur de l'analyse de la flore réside dans la saisonnalité de l'analyse de la végétation. L'hiver et l'automne, seules les espèces vivaces sont observables. Elles ne sont pas toujours déterminables en raison de l'absence de fleurs. Les inflorescences sont souvent essentielles pour une identification à l'espèce. Ainsi le meilleur moment pour les relevés se situe à la fin du printemps. A cette période, les plantes sont déterminables à l'espèce pour la plupart. Cette période est ainsi propice aussi bien à l'étude des espèces à floraison vernale[83] qu'à celle des estivales.

Ces dates d'études de la végétation ne sont pas compatibles avec les dates de certains chantiers de fouilles archéologiques, notamment en préventif. Les diagnostics ou fouilles préventives sont réalisés à toute saison et ne sont pas toujours suffisamment anticipés pour envisager une étude en amont.

4.2.2 Contraintes légales

L'étude de sites est soumise à une autorisation préfectorale. Chaque fouille ou prospection doit faire l'objet d'une demande. Un dossier est en ce sens envoyé au SRA concerné. Ce dossier passe devant une commission scientifique. Cette commission valide ou non la demande et soumet au Conservateur Régional de l'Archéologie son avis. Le Conservateur, ayant délégation de signature du préfet, délibère par l'émission d'un arrêté préfectoral. L'arrêté peut valider le projet en l'état ou émettre des réserves. Le choix des différentes

[83] Espèces végétales fleurissant au printemps.

techniques d'étude archéologique, peut ainsi être orienté à ce niveau décisionnel.

La demande d'autorisation est généralement accompagnée d'une demande de financement des opérations. Ces financements sont habituellement accordés par le ministère de la Culture et le Conseil Général du département concerné. En fonction du financement accordé, les analyses envisagées sont plus ou moins possibles.

4.2.3 Milieu perturbé

4.2.3.1 par les usages actuels

Certains usages actuels ont un impact très fort sur la végétation.

Le pâturage, en ce sens, opère une sélection des espèces. Les espèces d'une prairie pâturée sont ainsi celles qui résistent au broutage et au piétinement. Ces deux perturbations ne sont pas homogènes sur l'ensemble d'une parcelle. Les herbivores organisent leur environnement. Le broutage délaisse parfois certaines zones. Ces zones de refus sont en général privilégiées pour les fèces et ne sont pas pâturées. Le bétail passe aussi préférentiellement dans certaines zones et crée des cheminements. Ce cas poussé à l'extrême a pu être observé lors de l'étude du site d'atelier de potier de la Grande Motte au nord de la forêt de Fougères (EA n°351420010, Landéan, Ille-et-Vilaine)[84]. Après avoir discuté avec M. Bouvet, l'exploitant de la parcelle, il est apparu que l'emplacement de l'auge l'année précédente coïncidait avec l'emplacement présumé du four. Cette relation spatiale est due à un choix délibéré de l'exploitant. L'amas de ratés de cuisson forme en effet un léger relief, augmente le drainage du sol et favorise ainsi les écoulements autour de l'auge. Le passage répété des animaux autour de l'auge avait modifié l'état de surface du sol et la nature de la végétation. Il était ainsi impossible de dire si la différence de végétation était liée au piétinement et à l'enrichissement du sol par le bétail ou à la présence de structures archéologiques. La présence d'espèces comme *Plantago major*, *Polygonum persicaria* et *Chenopodium album* préférentiellement sur le site tendrait à pencher plus vers un impact du piétinement sur la flore qu'à un lien de la flore avec les structures.

Les études ont pour cela été choisies au niveau de zones où l'impact anthropique actuel semblait faible et homogène. Les pâtures, de part leur impact très fort sur la végétation, ont pour ces raisons dû être exclues de l'étude.

4.2.3.2 par les sondages archéologiques

Beaucoup d'opérations archéologiques se déroulent en plusieurs phases. Les fouilles impliquent souvent une gestion des déblais et des cheminements. Or, l'enfouissement et le piétinement sont deux facteurs pouvant radicalement bouleverser la végétation.

C'est le cas notamment des fouilles préventives. Ces dernières interviennent après diagnostics et parfois après des études d'impacts en environnement. Les diagnostics sont réalisés à la pelle mécanique et perturbent ainsi nettement la végétation par le passage d'engin

[84] Site inscrit à la carte archéologique comme étant une motte : cependant, la présence de parois de four et de nombreux ratés de cuisson indique que l'on a affaire à un site d'atelier de potier (observations personnelles et communication C. Bizien-Jaglin).

et la réalisation des sondages. Il est impossible a *posteriori* d'isoler les zones non perturbées. Les fouilles préventives ont donc dû être exclues de l'étude.

Les fouilles programmées pluriannuelles rentrent aussi dans cette catégorie. Sur ce genre d'opération, les usages des années précédentes risquent d'avoir perturbé la végétation. Pour le site de l'île aux Moutons (EA n°290580009, Fouesnant, Finistère), il est apparu après discussion avec G. Hamon, la responsable d'opération, que la zone de fouille correspondait à l'emplacement du tas de déblais de l'année précédente. Ce site a donc dû être abandonné.

Pour ces raisons, il faut être très vigilant sur les sites où des opérations ont déjà été menées.

4.2.4 Absence de témoins

Parfois les structures archéologiques ont un net impact sur le paysage. Les mottes ou les ferriers sont très fréquemment épargnés par les labours, du fait de leur relief ou de leur nature. Cette absence de labours permet alors le développement d'un bosquet suivant les limites de ces structures. Cela a notamment été le cas du ferrier du Vert Pignon (EA n°352110091, Paimpont, Ille-et-Vilaine). La fouille programmée de ce ferrier, dirigée par J.-B. Vivet, a fait l'objet d'une étude de végétation préalable. Les limites du bosquet correspondaient à celles du ferrier. Aucune zone du bosquet n'a donc pu servir de témoin. Ces témoins permettent de comparer la végétation des structures avec des zones vierges de structures. En l'absence de témoins, la mise en évidence de différences de végétation entre les zones de structures et le milieu environnant est alors impossible. Ce site a donc dû être retiré de l'étude.

4.2.5 Milieu trop particulier

Parfois certains sites sont localisés dans des milieux très particuliers notamment au niveau géologique. L'étude de ce genre de milieux est fondamentalement intéressante. Il est cependant inconcevable de dépenser autant d'effort pour la découverte d'espèces végétales archéo-indicatrices ne répondant que sur ces milieux ultra-minoritaires.

En Bretagne, les milieux calcaires non littoraux sont quasi inexistants. Le site de la villa du Quiou (EA n°222630001, Le Quiou, 22) situé sur une poche de faluns de l'Anjou a pour cela été abandonné.

4.2.6 Structures mal localisées

Sur beaucoup de sites, il est inconcevable de réaliser une étude exhaustive de la végétation étant donné leur ampleur. Il est donc nécessaire d'opérer un choix judicieux dans l'implantation de la zone d'étude. Ce choix doit se faire en fonction de l'organisation des sites et de l'emplacement des structures. Cette organisation est quasi toujours inconnue en l'absence de fouilles.

4.3 Réponses aux problèmes rencontrés

4.3.1 Organisation de campagnes de fouilles

Parfois certains sites semblent très appropriés à ce genre d'étude. Faute de fouilles prévues, il est parfois nécessaire pour la thèse d'organiser soi-même des campagnes de fouilles ou de prospection. Cela a été le cas du site de Kervédan et de Pont-Calleck.

4.3.2 Etudes préalables des sites

4.3.2.1 Analyse micro-topographique

L'analyse préalable la plus simple des sites est de réaliser une étude micro-topographique. D'anciennes structures en élévation ou en creux laissent des micro-reliefs encore décelables. Il est intéressant de les cartographier pour mieux comprendre l'organisation spatiale des sites. Cette cartographie permet de réaliser de bonnes interprétations en comparant l'organisation avec les résultats de fouilles de sites similaires ou d'autres endroits du même site.

4.3.2.2 Prospection géophysique

Sur certains sites plus érodés ou plus enterrés, la majorité des structures n'apparaissent pas en micro-topographie. Il est pour cela nécessaire de passer à d'autres méthodes d'investigation. Les meilleurs procédés non intrusifs pour ce genre de prospection sont les méthodes géophysiques. Il est possible de mettre en œuvre différentes méthodes (électriques, électromagnétiques, magnétiques…) qui apporteront chacune des éléments décisifs à la cartographie des structures enfouies.

Résumé

Pour réaliser les études phytoarchéologiques de cette thèse, il est nécessaire de bien choisir les sites d'étude. Les contraintes sont d'ordre archéologique et botanique.

Le choix doit se porter sur des sites connus afin de ne pas réaliser de lourdes études de végétation qui n'apporteraient pas de résultats du fait de l'absence de site. Les sites choisis doivent être susceptibles de modifier la flore. Les sites importants, non enfouis sous de fortes épaisseurs sédimentaires et assez récents doivent être privilégiés. Il est aussi préférable de s'intéresser à des sites où des études sont prévues afin d'en bénéficier.

Les milieux naturels de ces sites doivent être appropriés. Chaque milieu végétal a sa propre échelle d'étude. Ces échelles d'étude ne sont pas toujours compatibles avec l'échelle d'étude des structures archéologiques. Les milieux sont sélectionnés suivant ce critère d'échelle.

Des problèmes peuvent être rencontrés dans ce choix des sites. Il n'est pas possible de connaître toutes les opérations archéologiques qui seront programmées sur une région. Parfois ces études n'offrent pas des délais suffisants pour réaliser une analyse phytoarchéologique préalable. Les milieux peuvent être perturbés par les usages actuels, mais aussi par des opérations archéologiques antérieures. Parfois, le milieu est trop particulier pour être étudié, ou trop limité au site. Il est alors difficile de trouver des témoins. Enfin les structures ne sont pas toujours bien localisées.

Face à ces problèmes, il est nécessaire de faire des compromis. Il faut parfois réaliser soi-même les fouilles lorsqu'un site paraît idéal mais qu'aucune étude archéologique n'est prévue. Afin d'orienter l'implantation des zones d'études, il peut être utile de réaliser des études préalables par analyse microtopographique ou prospection géophysique.

Chapitre 5 Sites d'étude choisis

Les contraintes archéologiques et botaniques ont été prises en compte dans le choix des sites d'étude. Quatre sites ont finalement été retenus pour y effectuer une analyse phytoarchéologique.

5.1 Le Goënidou (Berrien, Finistère)

5.1.1 Présentation

5.1.1.1 Localisation

Le premier site étudié est celui du Goënidou (EA n°29 007 0040). Il est situé au nord-ouest de la commune de Berrien dans le Finistère. Le site s'étend sur environ cinq hectares. Les parcelles concernées sont les parcelles 110, 111, 113, 114, 115, 1606, 1607, 1608 (section OA, cadastre numérisé de 2009) (fig. 4).

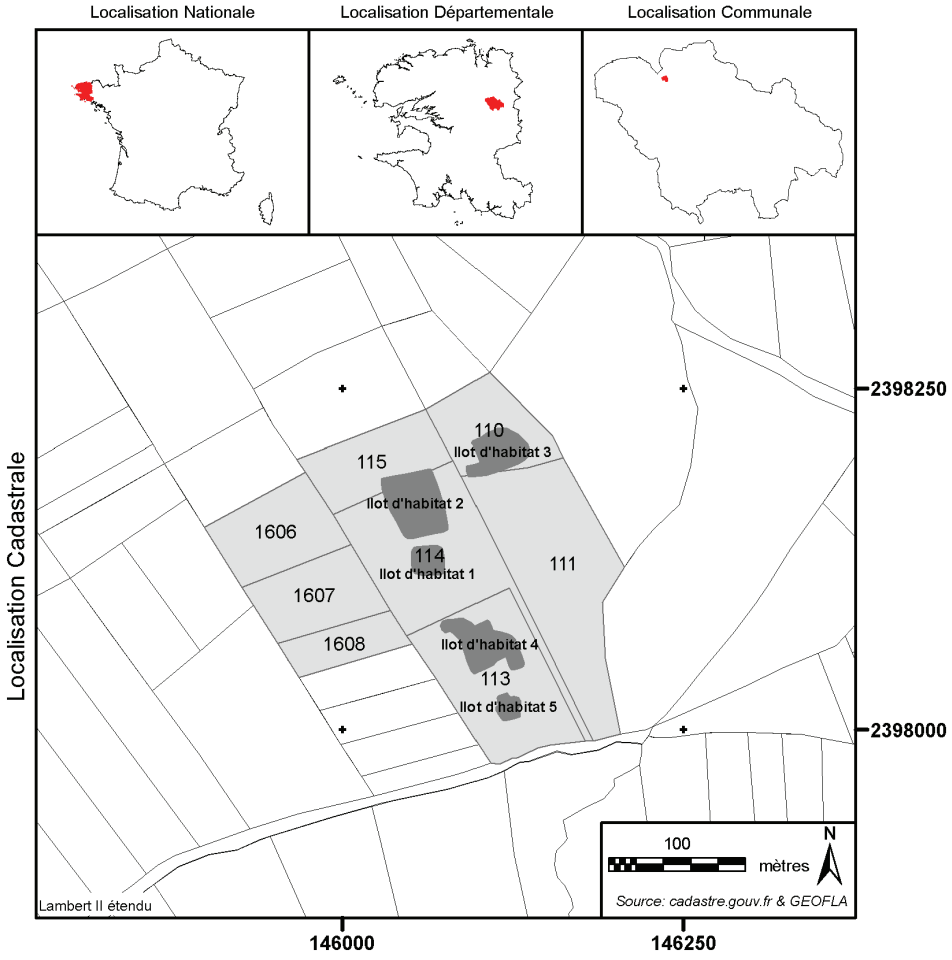


Figure 4 - Localisation du site du Goënidou

5.1.1.2 Contexte archéologique

Le Goënidou est un habitat médiéval déserté à la fin du XIV°siècle. En 1983, la mise en valeur des terrains alors en friche avait permis à l'Association pour la Sauvegarde du

Patrimoine d'Arrée de le découvrir au niveau de la parcelle 114. Son signalement au SRA Bretagne a été effectué début 1984 par J.-Y. Paul, membre de l'association.

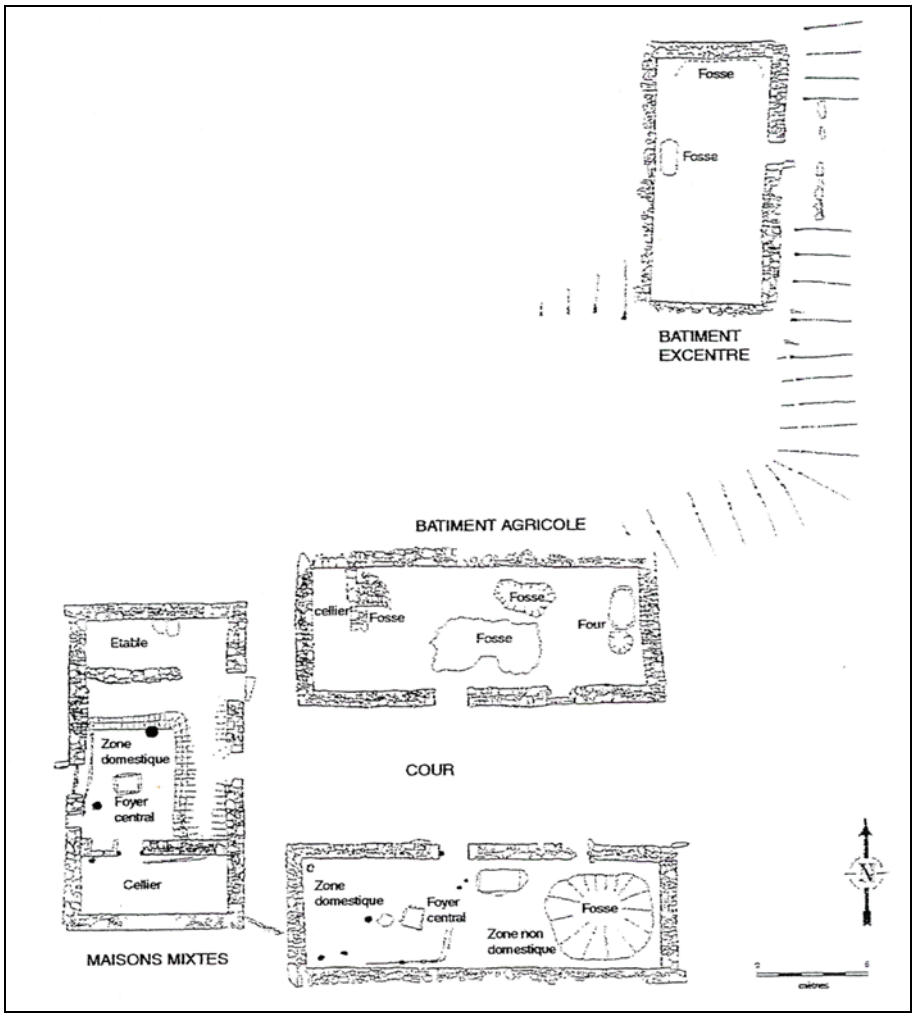


Figure 5 - Plan de fouille de l'îlot d'habitat du Goënidou fouillé de 1984 à 1987

Une fouille de sauvetage a eu lieu dès 1984, suivie de trois campagnes de sauvetage programmé en 1985 et 1987 (Barrère, 1984, 1985 ; Barrère & Batt, 1986). Ces investigations ont mis au jour trois bâtiments organisés en U autour d'une cour et un bâtiment excentré (fig. 5). Le bâti découvert est de type rectangulaire à pignons. La faible masse de pierres enlevée pour dégager les structures laisse à penser que les murs étaient plutôt bas (fig. 6). Le foyer est généralement au sol en position centrale et la fumée devait s'échapper par une ouverture à l'aplomb dans la couverture. Cette couverture, posée sur une charpente supposée assez rudimentaire devait être en chaume ou en un autre élément végétal. Aucun élément de couverture en dur n'a en effet été découvert à la fouille. Seuls deux des bâtiments possédaient un foyer et peuvent être considérés comme bâtiments d'habitation. Leur organisation interne laisse supposer qu'ils servaient aussi à accueillir le bétail. Une zone dite domestique se démarque en effet d'une zone dite non domestique. Il est à penser que la cohabitation bétail-humains permettait un réchauffement mutuel. Ce type d'habitat est appelé maison mixte. Les autres bâtiments, quant à eux, devaient être à vocation purement agricole. Des fosses ainsi que des fours ont pu y être découverts. Ces bâtiments fouillés ont fait l'objet de restaurations pour

leur mise en valeur (fig. 7). Ce site est ainsi destiné à accueillir le public. Ces types de bâtiments, trouvés ailleurs dans la région, ont fait l'objet de reconstitutions à la ferme archéologique de Melrand (Morbihan).

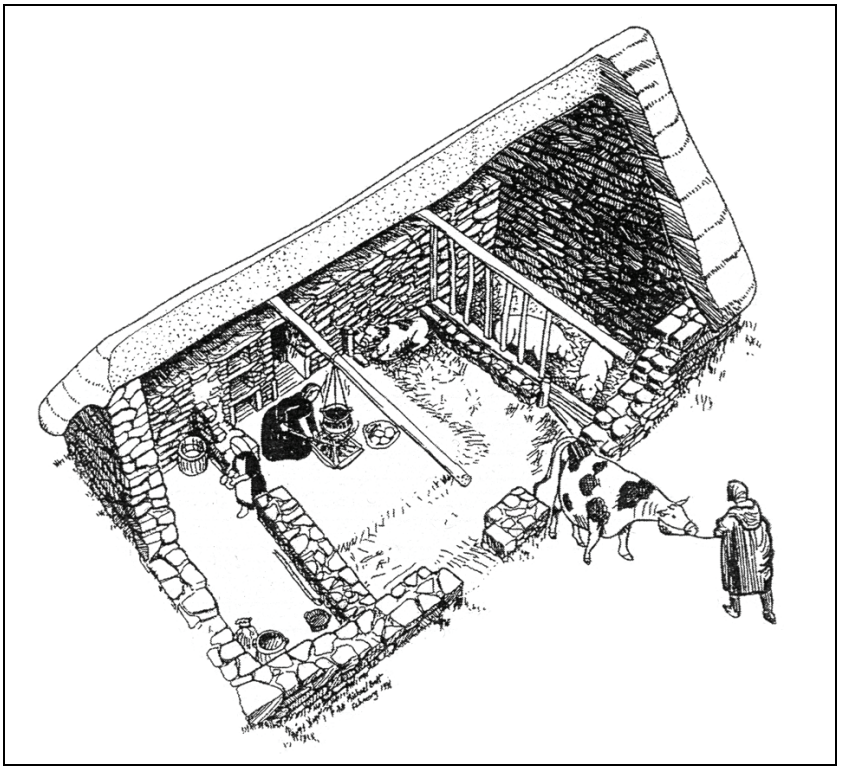


Figure 6 - Essai de restitution d'une des maisons mixtes fouillée du Goënidou

Figure 7 - Ilot d'habitat restauré du Goënidou

Associés à ces campagnes de fouilles, des relevés topographiques de la parcelle 114 ont permis de cartographier les différentes structures. L'habitat est apparu très organisé, regroupé en îlots suivant l'organisation parcellaire. Cette organisation semble répondre à une implantation volontaire et planifiée. Il est aussi apparu que le site s'étendait sur les parcelles 110 et 113. Les relevés de ces parcelles n'ont pas été réalisés, les relevés de la parcelle 114 étant considérés comme représentatifs.

Des campagnes de relevés micro-topographiques de 2001 à 2005 (fig. 8) ont permis d'étendre la cartographie aux parcelles attenantes (Batt, 2002, 2003, 2004). Il est apparu que l'implantation générale des îlots répondait assez fidèlement aux interprétations de 1984. Chaque îlot correspond à un « lotissement » constitué en général de trois bâtiments autour d'une cour et d'un bâtiment annexe. En revanche, chaque îlot avait son orientation propre. La planification n'est donc pas aussi rigide que celle pressentie en 1984. Les relevés micro-topographiques ont révélé un important système parcellaire se développant autour des îlots suivant les mêmes orientations.

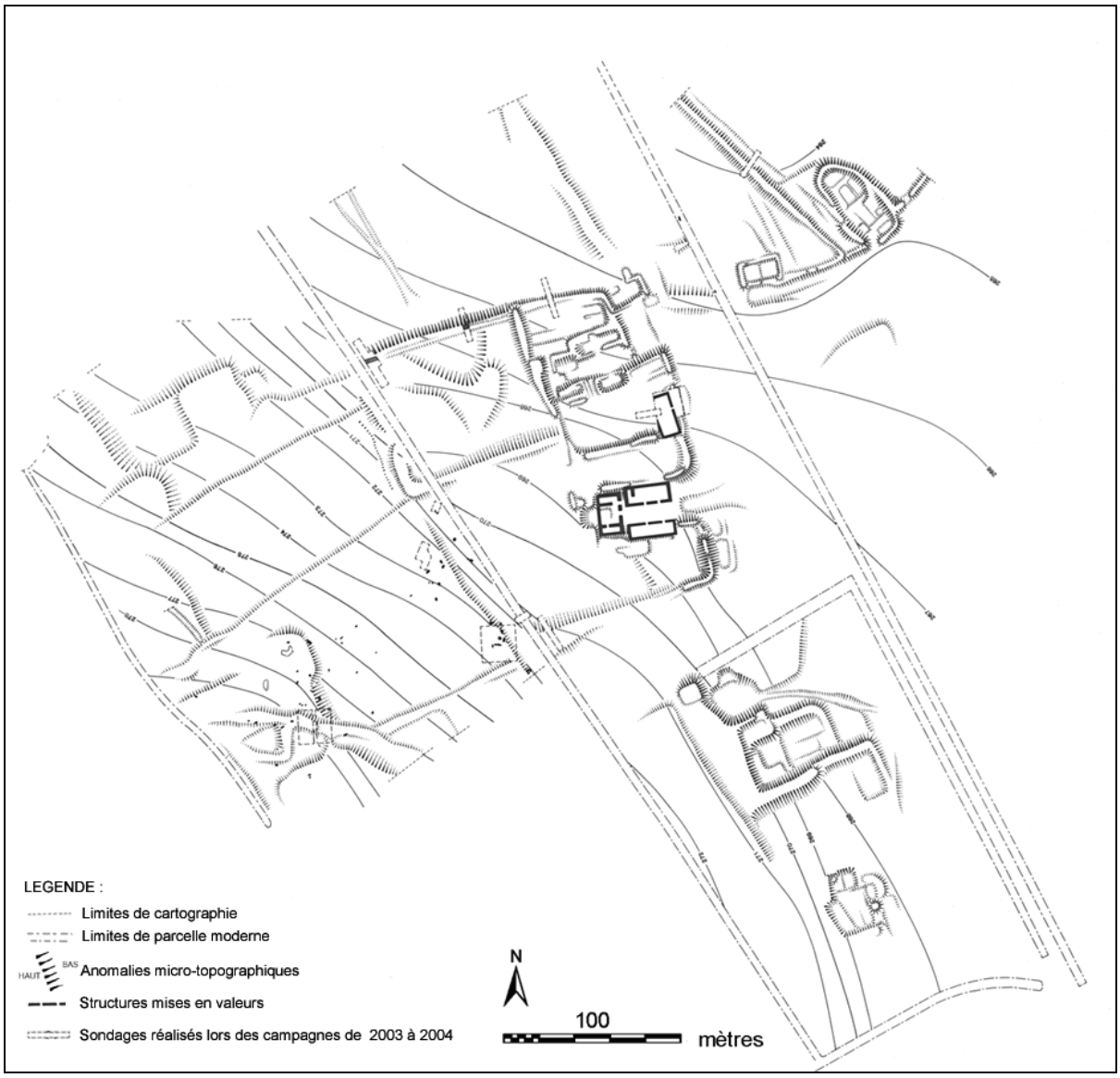


Figure 8 - Relevé microtopographique 2004 du site du Goënidou (*Source : Batt, 2004*)

Des sondages ont été réalisés au niveau de ces éléments parcellaires en parallèle des relevés de 2003 à 2005. La fouille révèle que la plupart des éléments parcellaires sont déjà existants à la période antique. Chaque îlot de bâtiments médiévaux est adossé à ce parcellaire et suit globalement son orientation. Il est ainsi possible d'affirmer que l'implantation médiévale s'est appuyée sur un parcellaire préexistant encore visible dans le paysage. En revanche, si le mobilier antique est abondant au niveau des fossés, aucun élément matériel n'indique une utilisation médiévale du parcellaire. Il est toutefois à noter que les pratiques économiques de ces deux cultures matérielles sont très différentes. Autant l'époque antique apparaît comme prodigue, autant l'époque médiévale apparaît comme économe au regard de l'abondance de matériel archéologique sur les sites.

Face au potentiel archéologique du site et dans un souci de conservation, les parcelles 109, 110, 113, 114, 115, 1605 et 1607 ont été achetées par le Conseil Général du Finistère.

5.1.1.3 Contexte environnemental

Le substrat géologique des Monts d'Arrée est diversifié. Le schiste habituel cède parfois place à des massifs granitiques. Les zones de transition sont souvent caractérisées par des quartzites.

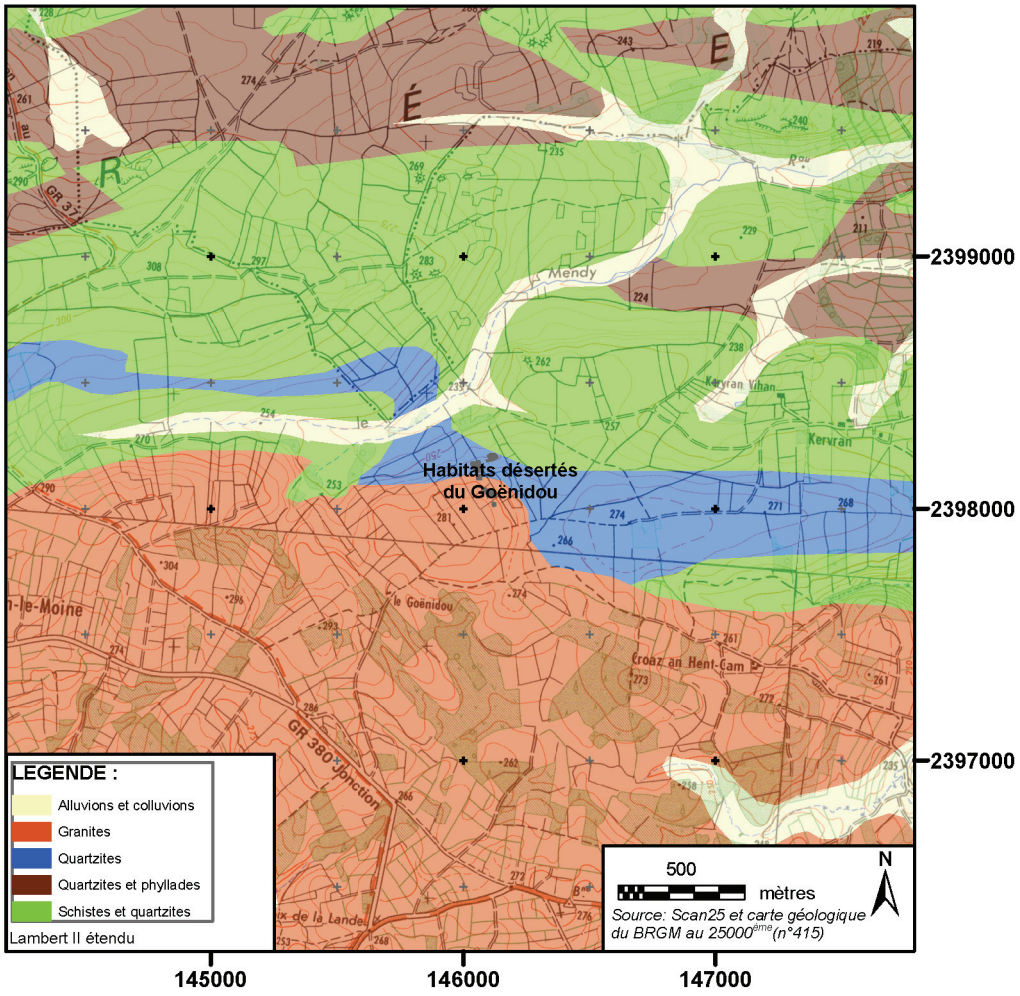


Figure 9 - Environnement géologique du site du Goënidou

Ces différents substrats ayant une dureté très différente, l'érosion a modelé le paysage par le développement de profondes vallées. Les roches les plus dures forment quant à elles des crêtes qui comptent parmi les plus hauts points du Massif Armoricain.

Le site du Goënidou s'est implanté sur le versant sud de la vallée du Mendy. Trois types de roches coexistent ; les monzogranites sur les hauteurs laissent place aux quartzites puis aux schistes en descendant vers la vallée. Au niveau du site, la pente est douce et forme un léger replat. Un suintement peut être observé dans la partie est du site. Il a sûrement pour origine ce phénomène de replat topographique de milieu de pente (fig. 8 et 9).

Les parcelles concernées par les vestiges sont actuellement en lande. Cette lande est dominée par la fougère aigle (*Pteridium aquilinum*) favorisée par des fauchages. Au niveau des parcelles 113 et 114, la fauche est plus régulière afin de permettre l'accueil du public sur les zones mises en valeur après fouille. Sur ces parcelles, la fougère est en régression au profit d'un milieu prairial (fig. 10).

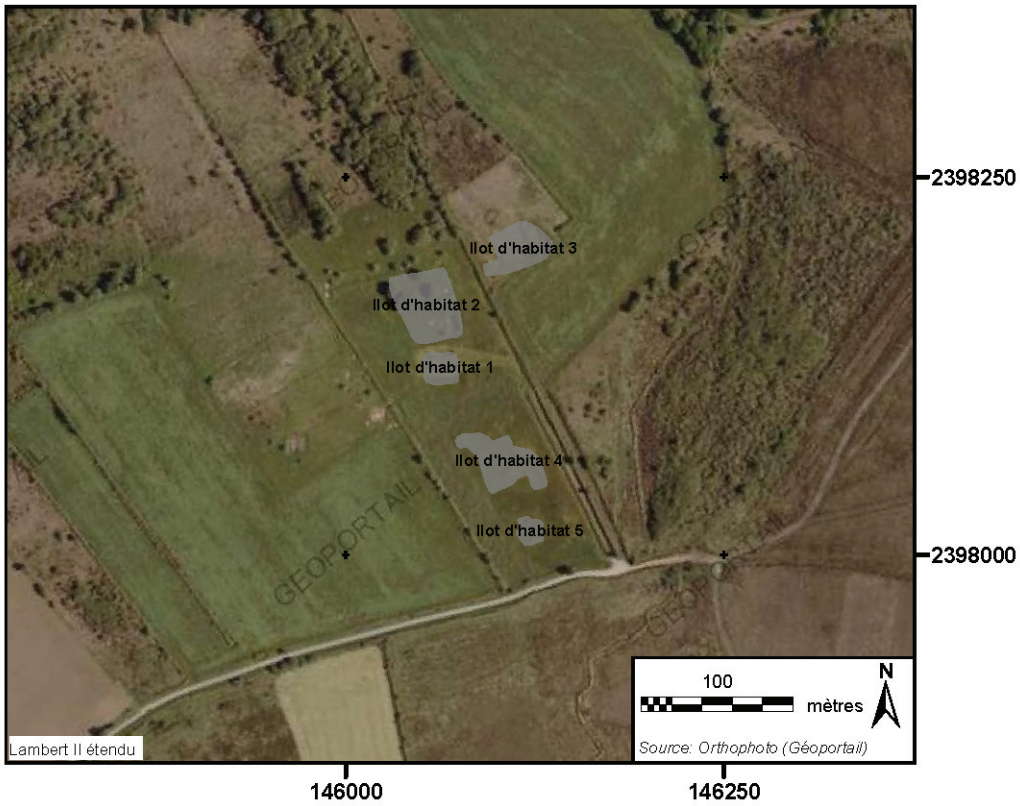


Figure 10 - Orthophotographie du site du Goënidou

5.1.2 Choix de la zone d'étude

5.1.2.1 Choix en fonction des structures

Les relevés micro-topographiques ont été réalisés dans le cadre de la reprise des recherches sur Le Goënidou par M. Batt. Ces relevés ont été réalisés de 2001 à 2005 par l'équipe de M. Corney de l'Université de Bristol. Ils concernent les parcelles 110, 111, 113, 114, 115, 1605, 1606 et 1607. Des fauches ont été réalisées à cette occasion. Afin de pouvoir prendre en compte l'organisation des structures dans le choix de la zone d'étude, celle-ci doit se limiter à

la zone relevée. Le choix s'est porté sur les zones de plus grande diversité archéologique afin d'espérer observer des différences d'impact en fonction de la typologie. En l'absence de fouilles, les seules structures repérables sont les éléments parcellaires et les îlots de bâtiments. La meilleure façon de capter cette diversité archéologique est de s'intéresser à un de ces îlots et au parcellaire environnant. Les parcelles cadastrales où habitats et parcellaires archéologiques coexistent sont les parcelles 110, 113 et 114 (fig. 8).

5.1.2.2 Choix en fonction des usages actuels

Sur les parcelles 113 et 114, une fauche bisannuelle est effectuée autour des habitats pour garantir l'accueil des visiteurs. La gestion n'est donc pas homogène sur l'ensemble de ces parcelles. Ces deux parcelles avaient fait l'objet de labours et de travaux de nivellements autour des bâtiments au début des années 1980. Ces labours menaçant les bâtiments avaient d'ailleurs été la motivation principale des campagnes de fouilles de 1984 à 1987 (Barrère, 1984, 1985 ; Barrère & Batt, 1986). De plus, afin d'éliminer la fougère aigle, un traitement à l'Azulam avait été effectué sur ces mêmes parcelles. La parcelle 110 est quant à elle restée en réserve archéologique et n'accueille pas le public. Cette parcelle peut donc être choisie car elle est la seule à ne pas avoir fait l'objet d'une gestion drastique. Ses marges n'ont pas été retenues afin d'éliminer tout effet écotone[85]. La zone d'étude se limite ainsi à une surface de quarante mètres sur cinquante environ (fig. 11).

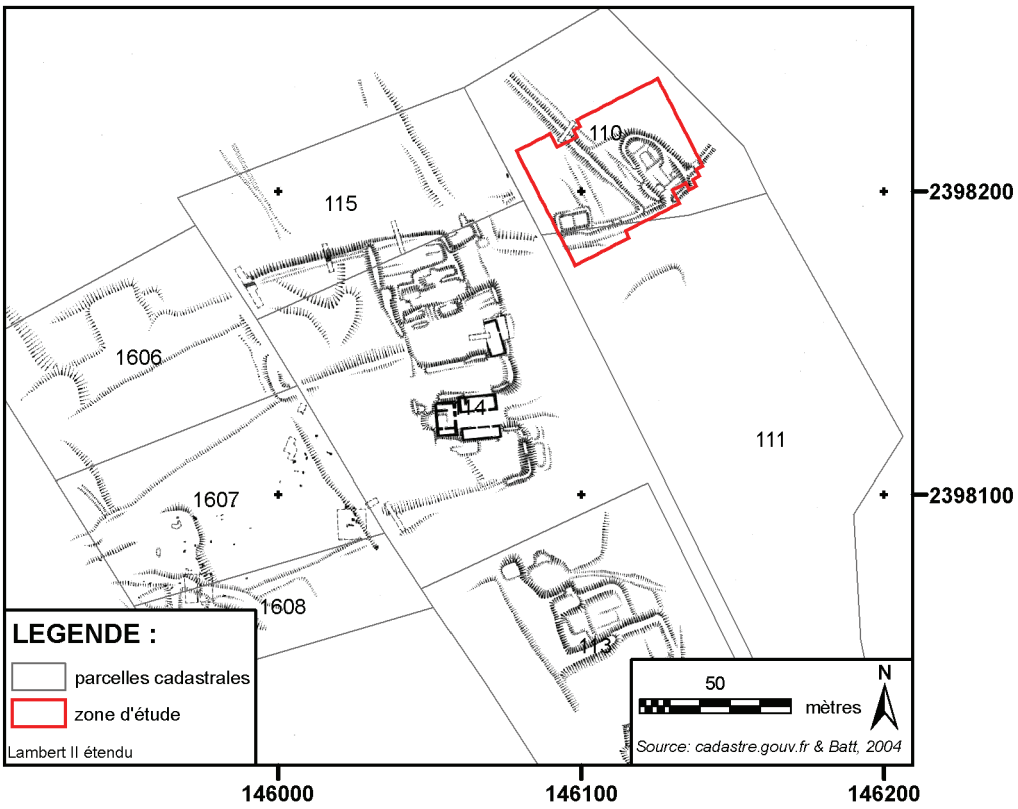


Figure 11 - Emplacement de la zone d'étude du site du Goënidou

[85] Se dit de l'effet lisière : à la lisière de deux milieux, les espèces des deux milieux sont présentes en plus d'espèces propres à la lisière elle-même.

5.2 La Montagne (Visseiche, Ille-et-Vilaine)

5.2.1 Présentation

5.2.1.1 Localisation

Le deuxième site d'étude est celui de La Montagne (EA n°29 007 0040). Il est situé à l'ouest de la commune de Visseiche, au sud de l'Ille-et-Vilaine. Le site s'étend sur les parcelles 318 et 324 et déborde légèrement sur les parcelles 319 et 572 (section 0D, cadastre numérisé de 2009) (fig. 12).

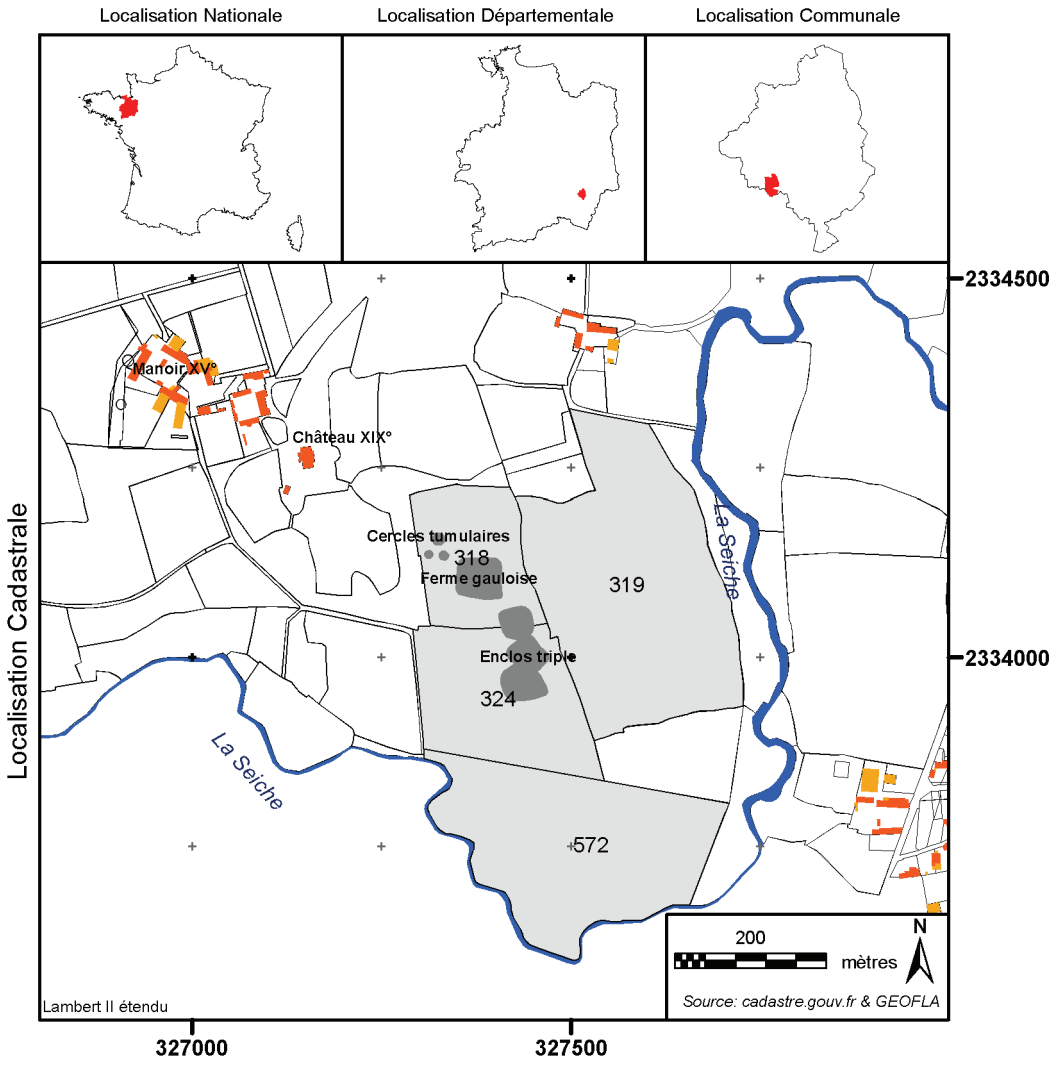


Figure 12 - Localisation du site de La Montagne

5.2.1.2 Contexte archéologique

Le site de La Montagne a été découvert en prospection aérienne à basse altitude par G. Leroux. Les prospections régulières menées depuis la fin des années 1980 ont permis de découvrir tout un ensemble de structures (Leroux, 1992, 1993).

Dans la parcelle D318, trois petits enclos évoquent des *tumuli*. L'un d'entre eux, de 9 mètres de diamètre, a fait l'objet d'une fouille exhaustive par J.-C. Meuret (Meuret, 2006a). A

l'intérieur, la présence de trois grandes fosses permet de renforcer l'hypothèse de *tumuli*. Aucun ossement n'a été décelé permettant de confirmer la fonction sépulcrale de ces fosses. Dans le fossé, des fragments de céramiques vraisemblablement de la fin de l'Age du Bronze-début du premier Age du Fer (Hallstatt) ont été recueillis et permettent de dater la construction de ce monument.

Ce *tumulus* est recoupé par un fossé de la fin du deuxième Age du Fer (Tène finale). Ce fossé fait partie d'un système d'extensions parcellaires d'un enclos quadrangulaire situé au sud-est. Cet enclos a été fouillé partiellement de 2004 à 2006 (Meuret, 2004, 2006a). Il a pu être mis en évidence que cet établissement correspondait à une ferme indigène. Cet établissement gaulois puis gallo-romain fonctionna de 120 av. J.-C. à 50 ap. J.-C. environ. A l'intérieur, de nombreux trous de poteaux indiquent la présence de bâtiments domestiques ou agricoles. Les activités domestiques mais aussi artisanales ont laissé des traces telles que fosses d'extraction, meules, fours, foyers, scories.

Au sud-est, un système d'enceinte triple a aussi été mis en évidence. Celui-ci déborde sur la parcelle D324. Une fouille partielle a été réalisée en 2003 (Meuret, 2003). Quelques rares structures ont été révélées à l'intérieur des enclos indiquant la présence de bâtiments internes. Le système d'entrée est pour sa part particulièrement imposant. Cette observation va dans le sens d'un habitat aristocratique. Le mobilier trouvé renforce le côté aristocratique de l'établissement, tel que fer à cheval, pièces de harnachements, verre. Ce mobilier et les datations radiocarbone indiquent une occupation du XIV°-début XV° siècle. L'étude des textes d'archives permet de rapprocher ce site d'un manoir primitif construit au XIII° et abandonné début XV° siècle (Meuret, 2006b).

Ce manoir primitif, stade intermédiaire entre motte de terre et manoir de pierre, a été délaissé au profit du manoir de la Montagne construit au nord-ouest sur les hauteurs. Les bâtiments de ce manoir du XV° siècle, encore en partie conservés, sont clairement visibles sur le cadastre napoléonien.

Ce manoir a finalement été abandonné au XVIII° siècle. Au XIX° siècle, un château et son parc se sont implantés en ces mêmes lieux.

Ce site a ainsi fait l'objet d'une occupation ininterrompue de l'Age du Bronze à la période actuelle.

5.2.1.3 Contexte environnemental

La région est dominée par des argilites-siltites et wackes tendres. Ils laissent parfois apparaître les roches sous jacentes que sont les grauwackes feldspathiques, les silites à lamines et des niveaux gréseux. Parfois ce substrat est entaillé par des filons de quartz et de microdiorites. Ce substrat parfois profondément altéré est recouvert de poches d'altérites argilo-sableuses assez importantes. Le substrat est aussi fortement fracturé. Les failles principales sont d'orientation générale nord/sud. Pendant les périodes glaciaires, des lœss ont été déposés par le vent. L'érosion de ces lœss n'est pas totale, il en reste quelques lambeaux sur certains plateaux. Les phénomènes érosifs ont modelé le paysage en créant des vallées. Ces vallées sont parcourues par des rivières, notamment la Seiche, qui ont déposé des alluvions. Certaines alluvions assez anciennes remontent au dernier épisode glaciaire

(glaciation du Würm). Dans certaines cuvettes, il est aussi possible d'observer des colluvions.

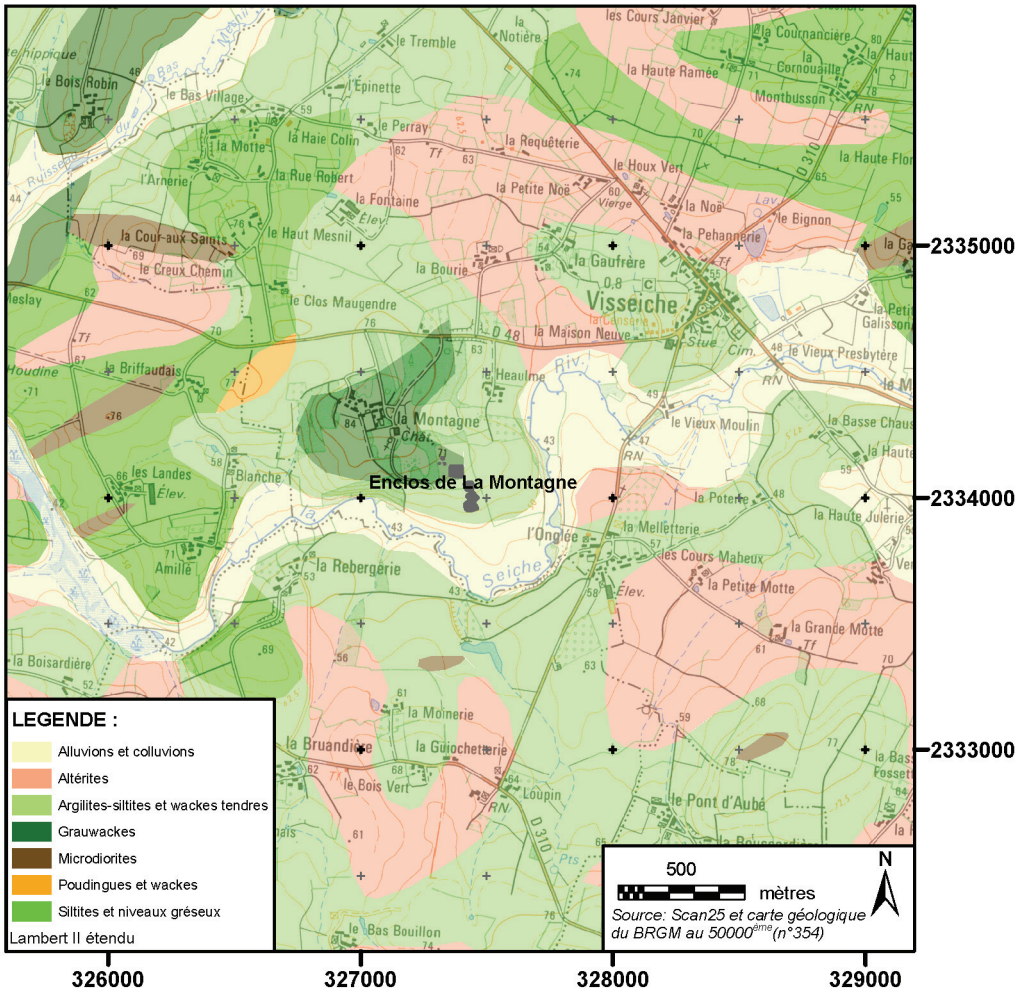


Figure 13 - Environnement géologique du site de la Montagne

Le site de la montagne s'est en particulier implanté sur un de ces bombements de grauwacke dominant la vallée de la Seiche. Les dénivellations sont assez importantes. Ce genre de relief est assez rare dans un paysage dominé par les plaines. Il semble évident que cette position topographique particulière a été délibérément choisie pour l'implantation du site. Au niveau de l'enclos triple étudié, la pente est plus douce et forme un léger replat. (fig. 13).

Les parcelles concernées par les vestiges sont labourées et généralement plantées de colza et de maïs. Le bocage est assez bien préservé. Au niveau du château, le parc arboré est encore présent et se distingue bien dans le paysage (fig. 14).

5.2.2 Choix de la zone d'étude

M.D. Hooper en Angleterre (Hooper, 1976), comme C. Perrein dans l'Ouest de la France (Perrein, 1984, 1986, 1987a, 1987b, 1991a) ont montré que l'âge des haies a une influence sur leur composition végétale. Il est donc nécessaire dans l'étude de l'impact de structures archéologiques sur la végétation de haies sus-jacentes, de limiter l'influence du facteur âge. La datation des haies anciennes devient de plus en plus envisageable (Follain, 2005).

Toutefois, c'est un processus lourd. Il est difficilement applicable à un vaste réseau bocager. Il est donc difficile d'isoler un groupe de haies synchrones. La seule manière de s'affranchir de ce facteur d'âge des haies est de ne s'intéresser qu'à une seule haie. Seule la haie entrecoupant l'enclos triple a été sélectionnée pour l'étude (haie séparant les parcelles D318 et D324). Cette haie est postérieure à l'abandon de l'enclos. Le talus a été érigé au plus tôt au début XV° siècle. Cette haie fait partie d'un ensemble de haies orthonormées. Ce parcellaire s'est ainsi clairement établi en une fois. Sur le cadastre ancien de 1827, ce parcellaire est représenté. En revanche, le château XIX^{e} siècle ne l'est pas. Le parcellaire est antérieur au château. Il ne peut être qu'associé au manoir érigé au XV° siècle plus au nord-est. Sa mise en place daterait de cette période.

Figure 14 - Orthophotographie du site de la Montagne

Les usages actuels ont un impact fort sur la végétation. Cet impact est notamment important pour ce qui est de la sélection des espèces ligneuses au cours de l'entretien des talus. En fonction du type de haie ou de l'exploitant, les essences sélectionnées peuvent varier. Il est essentiel de minimiser cette variation. La haie entrecoupant l'enclos présente deux morphologies. Chacune des deux morphologies est le résultat de deux types de gestion. Chaque type de gestion semble avoir été homogène. A l'Ouest, le talus n'est longé que par un fossé au sud et est couvert par une haie arborée. A l'est, aux alentours de l'enclos, le talus est bordé de deux fossés et couvert par une haie arbustive. Etant au niveau de l'enclos, seule cette dernière morphologie est retenue dans l'étude.

Afin de mettre en évidence des différences de végétation entre zones à structures et zones sans structures, il est nécessaire de disposer de relevés témoins. Le nombre de témoins doit

être proche du nombre de relevés sur structures. Il est pertinent de choisir une portion de haie couvrant à peu près autant de structures que de zones sans structures. La portion de haie gérée de manière arbustive répond assez bien à cette condition. Elle est donc retenue (fig. 15).

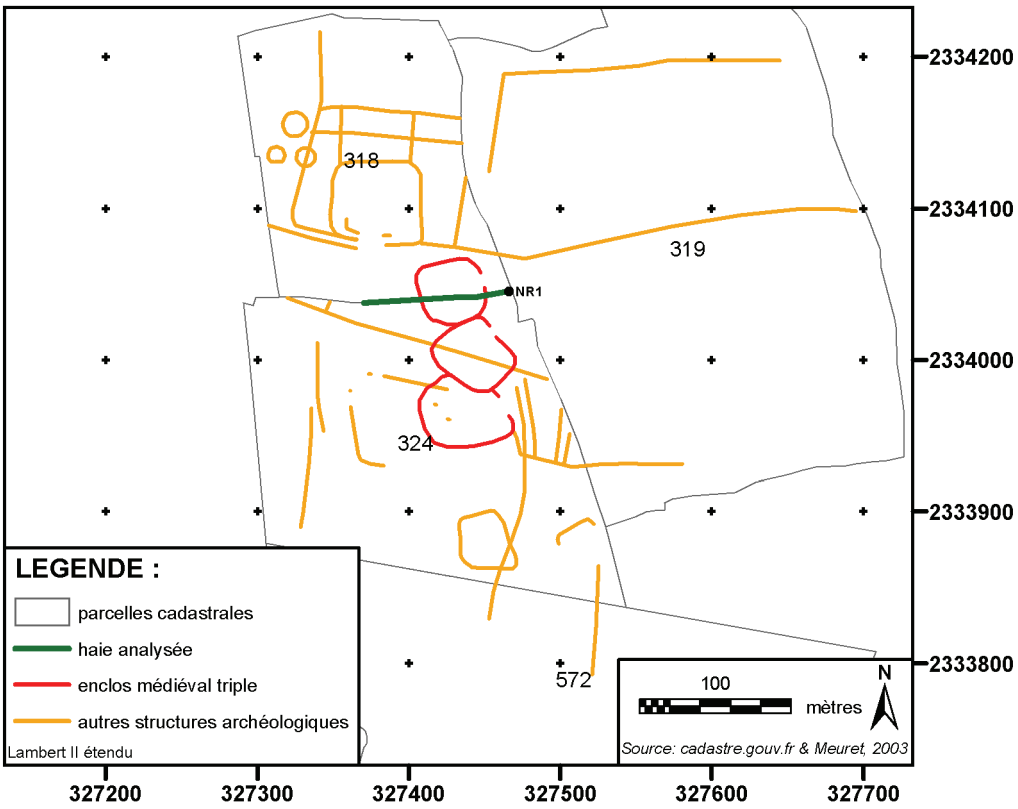


Figure 15 - Emplacement de la zone d'étude du site de La Montagne

5.3 Pointe de Kervédan (Groix, Morbihan)

5.3.1 Présentation

5.3.1.1 Localisation

Le troisième site étudié est celui de la pointe de Kervédan (EA n°560690061). Il est situé au sud-ouest de l'île-commune de Groix dans le Morbihan. Le site s'étend sur environ deux hectares. La parcelle concernée est la parcelle 54, (section ZA, cadastre numérisé de 2009). L'étude concerne la partie sud-ouest de la parcelle. Les parties les plus littorales qui correspondent aux falaises ne sont pas cadastrées (fig. 16).

5.3.1.2 Contexte archéologique

Ce site est appelé « Camp des Gaulois » ou « Camp des Romains » ou « Château de Kervédan ». C'est une pointe défendue par un système de remparts appelée éperon barré. Ces éperons barrés sont des structures qui peuvent avoir été érigées du Néolithique (5000 av. J.-C. environ) à la fin de l'Age du Fer (50 av. J.-C.). Celui qui nous concerne est un camp de la période gauloise à double retranchement (Milon & Giot, 1949).

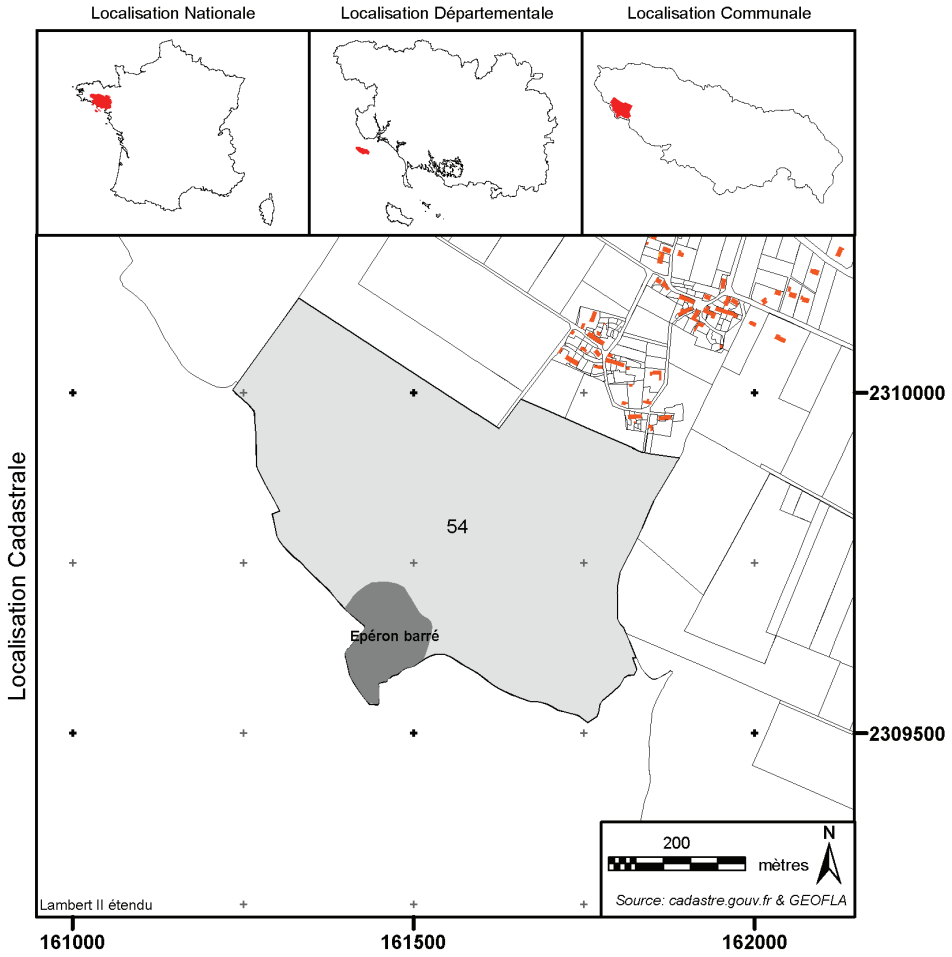


Figure 16 - Localisation du site de Kervédan

Le système de remparts est clairement visible en topographie via deux remparts parallèles. Ces remparts sont situés au niveau d'un étranglement de la pointe qui est dû à l'ouest à un surcreusement de la falaise et à l'est à l'incursion d'une micro-vallée. Le fossé du rempart externe va ainsi s'y perdre dans sa partie est. Le rempart externe utilise dans cette partie la berge naturelle et l'accentue. Il rejoint le rempart interne perpendiculaire à cette micro-vallée dont les parois deviennent abruptes dans sa partie la plus littorale.

En 1939, L.M. Threipland (Threipland, 1942) a réalisé des sondages au niveau du système de remparts (fig. 17).

Elle a découvert une série de cinq systèmes de talus-fossés entre les deux cités précédemment. Il a été mis en évidence un double changement du système d'entrée, qui a permis d'apporter des éléments de chronologie relative au sein du système de remparts parallèles :

- Lors d'une première phase, le rempart interne et cinq talus fossés intermédiaires sont élaborés. L'entrée dans les remparts est alors centrale (orientée nord/sud).
- La deuxième phase correspond à la création d'une nouvelle entrée orientée nord-ouest/sud-est recoupant les trois remparts externes. Ces trois remparts semblent avoir été abandonnés lors de cette phase.

- Dans une troisième phase, le rempart externe est érigé et condamne l'entrée précédente. La nouvelle entrée reprend alors le tracé initial central orienté nord/sud.

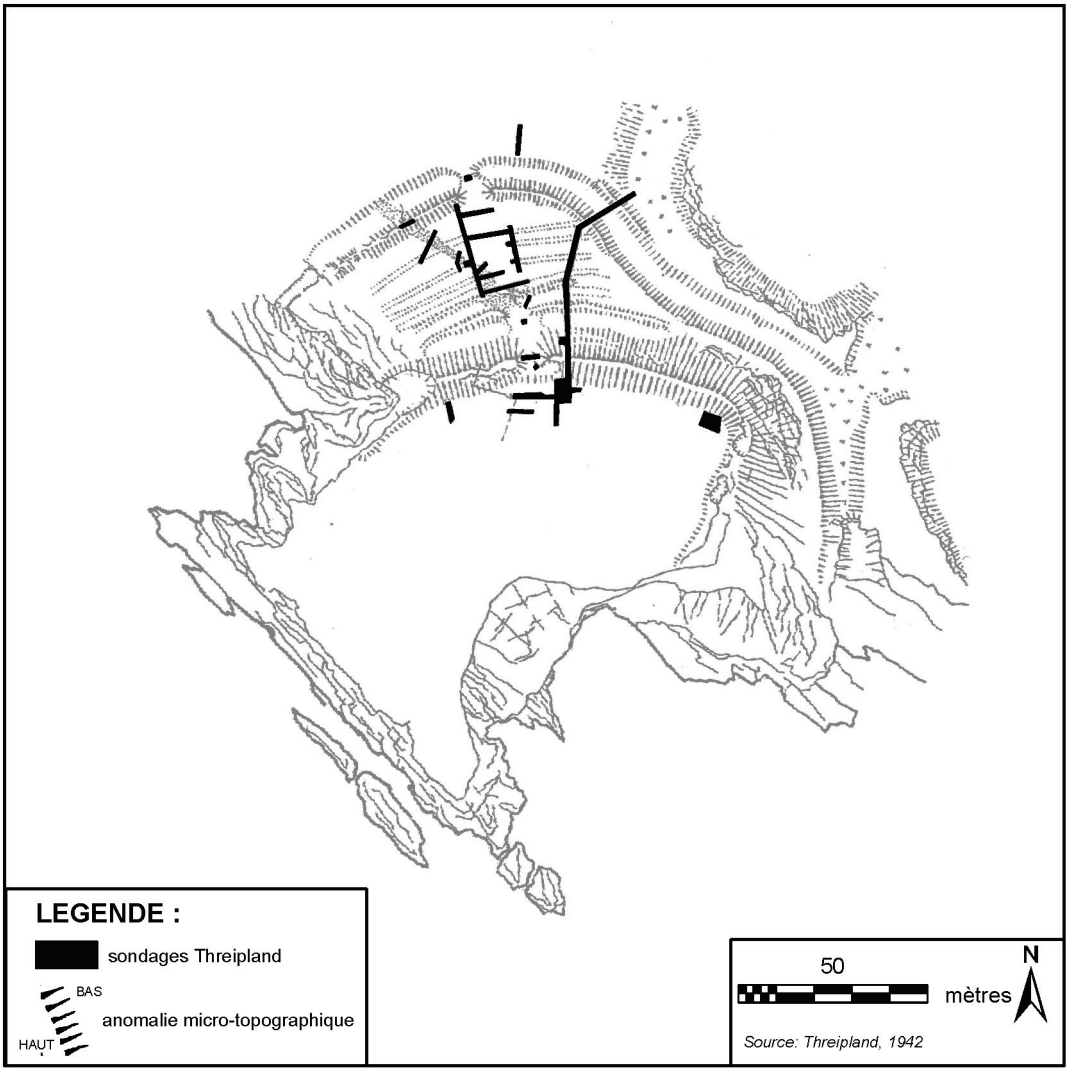


Figure 17 - Carte d'emplacement des sondages de 1939 et des structures observées par L.M**.** Threipland sur le site de Kervédan

Dans le comblement du fossé du rempart interne avait été retrouvé des fragments de céramique attribuable à la fin de l'Age du Fer. L'abandon du site daterait de cette période. Aucun matériel trouvé lors des sondages n'a été attribué à des périodes plus anciennes. Il n'est cependant pas exclu que les premières phases d'occupation soient antérieures.

Un sondage débordant sur l'intérieur de l'enclos avait aussi permis la découverte d'un petit bâtiment circulaire.

Les recherches ayant été stoppées durant la guerre 39-45, aucune fouille n'a été effectuée depuis lors.

5.3.1.3 Contexte environnemental

L'éperon est situé sur la côte sud-ouest dans la partie de l'île appelée "Piwisy". Cette partie diffère de la partie est appelée "Primiture" de par ses hautes falaises rocheuses (fig. 18).

L'île de Groix est caractérisée par une nature géologique particulière (fig. 18). La présence de schistes bleus (glaucophanites) et vert issus d'un métamorphisme profond du basalte de la croûte océanique est un fait remarquable. La remontée de ces roches en surface est quasi unique dans le Monde. Ce particularisme géologique a été à l'origine de la création de la réserve naturelle François Le Bail en 1982, unique réserve minéralogique de France. Cette réserve est gérée par la Société d'Etude et de Protection de la Nature en Bretagne (SEPNB). A ce statut de protection minéralogique vient se greffer une protection Natura 2000. Toute la côte groisillonne est classée à ce titre comme hébergeant des habitats et des espèces dont la protection est prioritaire en Europe. Les milieux littoraux sont en effet souvent très sensibles au tourisme, à l'urbanisation croissante et autres impacts humains, d'où cette protection.

Au niveau de l'éperon, schistes bleus et schistes verts ont laissé place aux micaschistes. La pointe rocheuse sur laquelle est situé l'éperon est bordée à l'est par un talweg humide dans lequel se développe une jonçaie[86]. En dehors de cette vallée, l'ensemble de l'éperon est caractérisé par une végétation de type pelouse littorale. En s'éloignant du littoral, la végétation évolue rapidement vers de la lande plus ou moins haute en fonction de sa gestion (fig. 19).

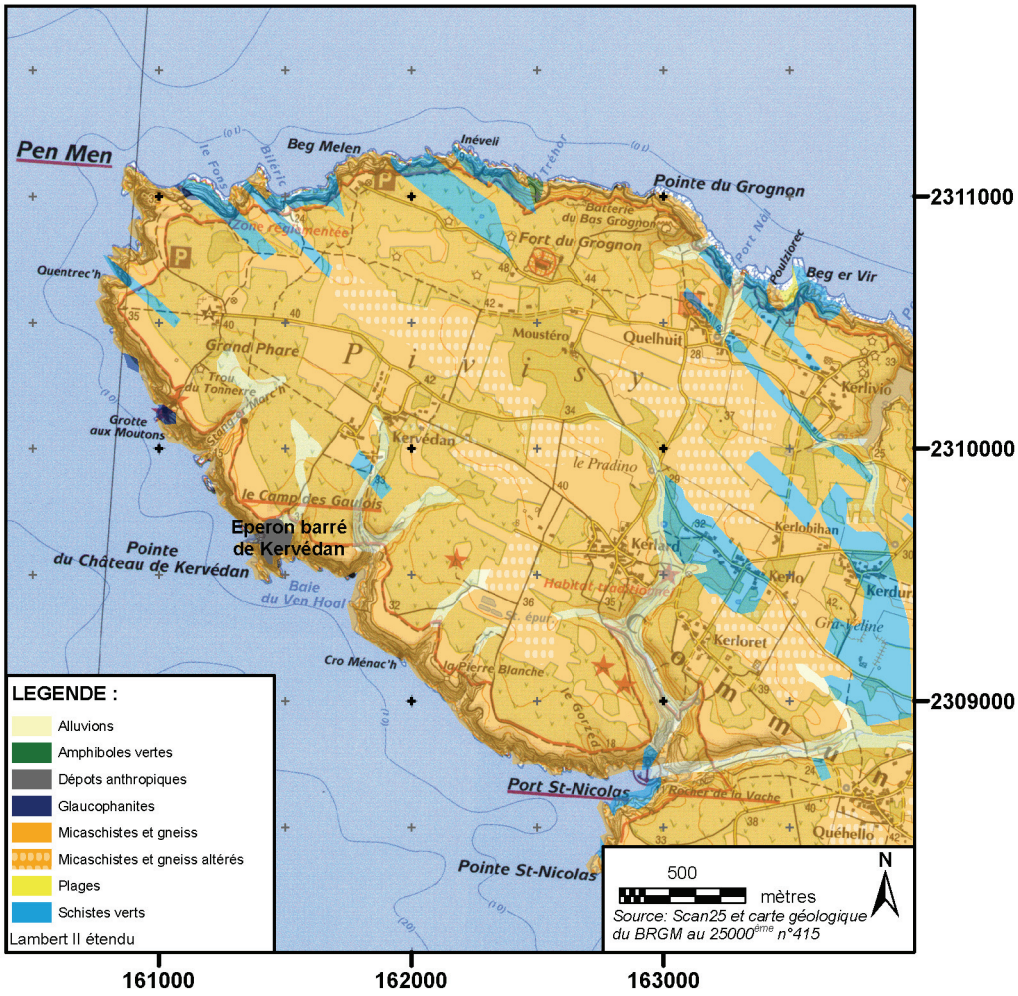


Figure 18 - Environnement géologique du site de Kervédan

[86] Formation végétale humide dominée par des joncs (ici : *Juncus maritimus*).

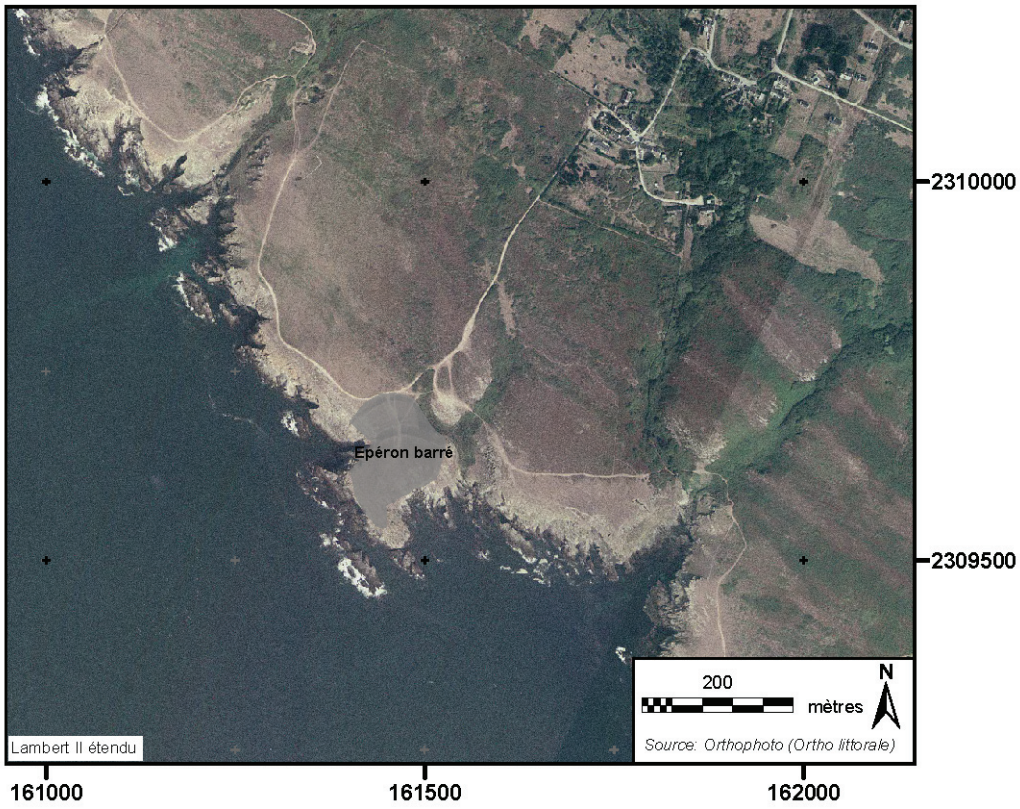


Figure 19 - Orthophotographie du site de Kervédan (source : ortholittorale 2000)

5.3.2 Choix des zones d'étude

5.3.2.1 Mise en place d'un carroyage

Avant d'effectuer les analyses topographiques, géophysiques, botaniques et archéologiques, il a été nécessaire d'établir un maillage de référence afin de pouvoir recaler spatialement les résultats de ces différentes méthodes. Dans l'optique éventuelle d'une reprise ultérieure de ces travaux, l'implantation du carroyage a dû se caler sur des points fixes facilement repérables.

Sur la pointe de l'éperon se situe une borne en béton. Ce point étant facilement repérable, il a servi de point de base à l'implantation du carroyage Sur le sommet de la borne, deux trous sont visibles. Le sommet du trou le plus à l'est a été considéré comme point de référence (B0). A partir de ce point, un point d'azimut a été placé au nord via une boussole de visée. Le carroyage a alors pu être développé suivant ce point et cette orientation de référence à l'aide d'un tachéomètre implanté au niveau du point considéré de meilleure visibilité c'est à dire sur le point le plus haut du talus interne. Le mode de placement de point du tachéomètre a permis d'implanter un carroyage lâche de 20 m de maille. La précision de ce maillage est centimétrique. Au décamètre, en utilisant les notions d'alignements et de prolongations, le maillage a pu être densifié assez rapidement à une maille de 4 mètres (629 piquets de référence) (fig. 20).

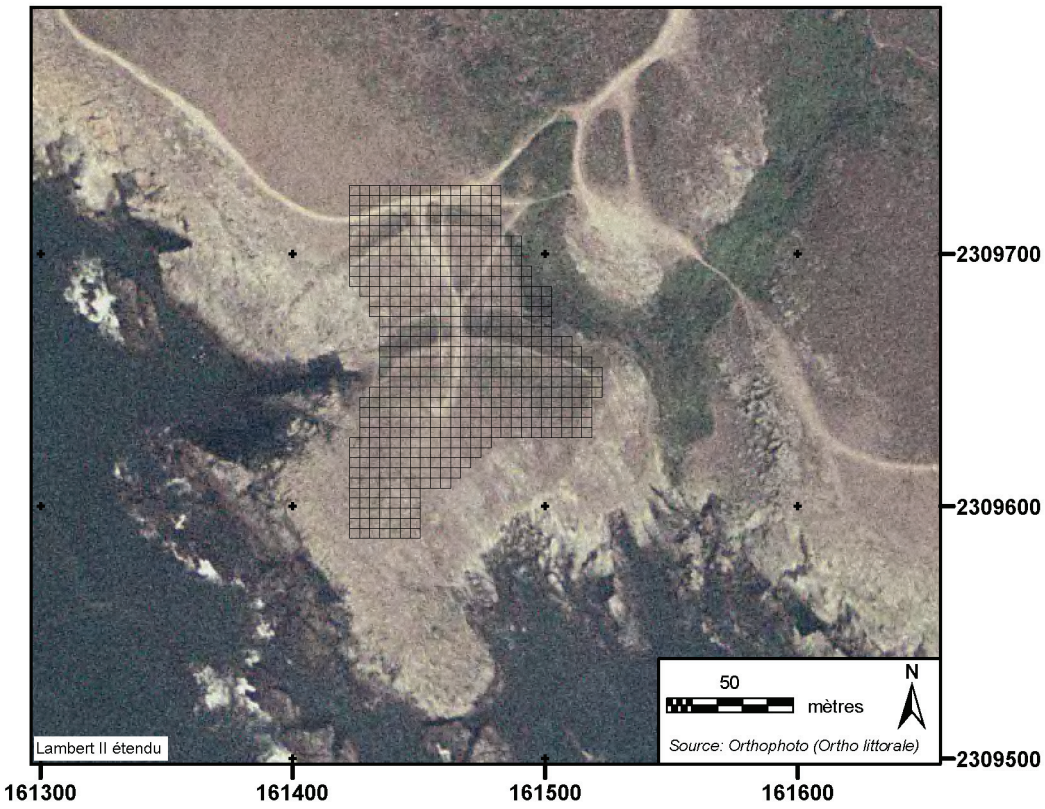


Figure 20 - Carroyage de référence du site de Kervédan (maille de 4m)

5.3.2.2 Analyse topographique de l'ensemble de l'éperon

Ce maillage a servi de base aux relevés topographiques. Un point de mesure tous les 2 mètres a ainsi été réalisé sur l'ensemble de l'éperon. Au niveau des zones de pentes et d'anomalies topographiques, des relevés supplémentaires ont été effectués.

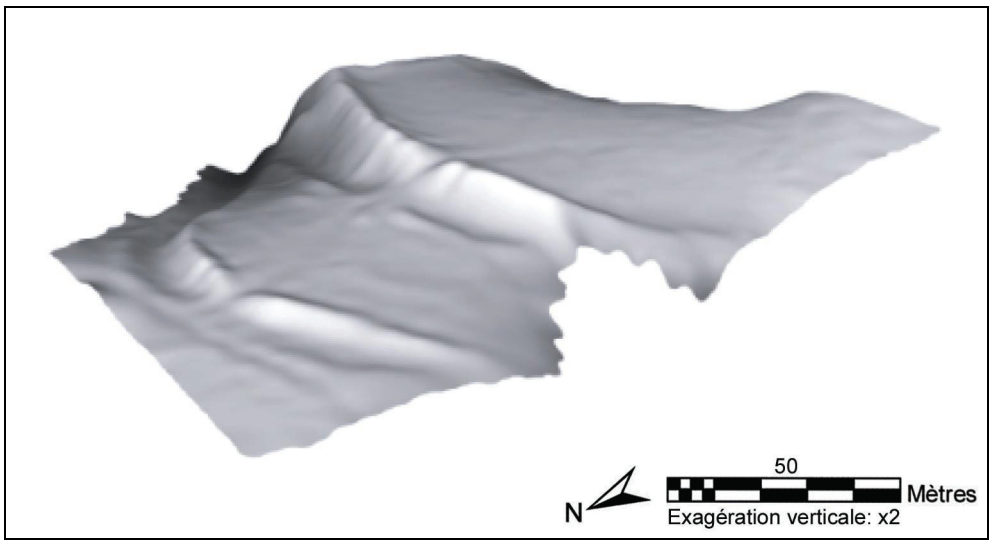


Figure 21 - Modèle numérique de terrain du site de Kervédan (vue 3D)

A partir des 27850 points de mesure, un modèle numérique de terrain a pu être construit

(fig. 21)[87]. La méthode d'interpolation employée a été la méthode modifiée de Shepard. Plusieurs modèles ont été réalisés en faisant notamment varier le facteur de lissage. L'appréciation des modèles a été réalisée via la visualisation des modèles de pentes (dérivées primaires). En effet, un modèle non lissé montre au niveau de sa dérivée des aberrations d'interpolation qu'il faut éliminer si l'on veut ensuite utiliser le modèle des pentes. Le modèle convenable retenu a été celui qui ne montrait plus de bruit et qui avait le plus faible facteur de lissage (plus ce facteur de lissage est élevé, plus le modèle risque de ne plus passer exactement par les points mesurés).

5.3.2.3 Recalage du plan établi lors des sondages de 1939

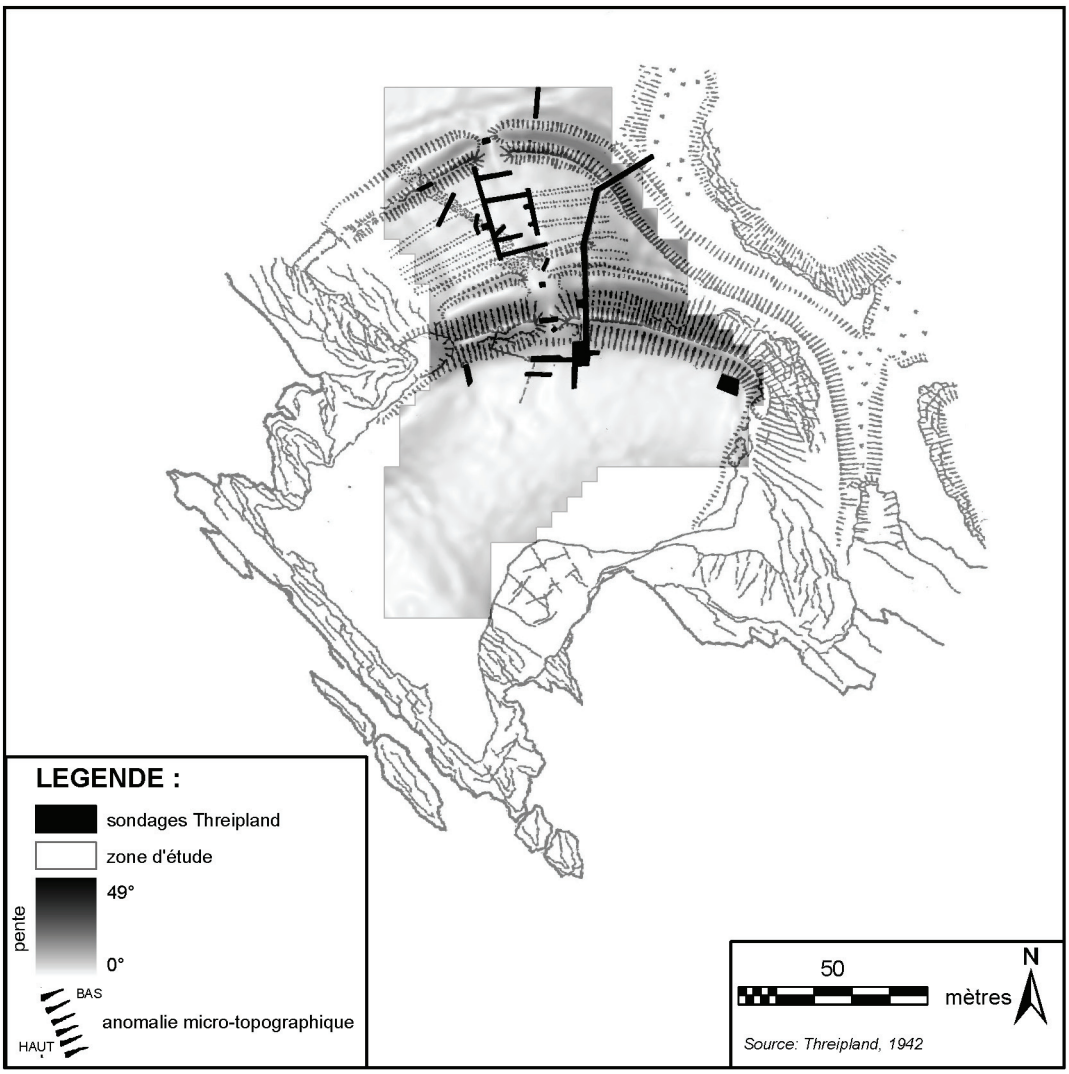


Figure 22 - Géoréférencement du plan de L.M.Threipland

Afin de relocaliser les anciens sondages, il a fallu géoréférencer le plan réalisé par L.M. Threipland (Threipland, 1942). Le plan étant réalisé "à l'Anglaise", c'est à dire par représentation des zones de pentes, le géoréférencement logique a consisté à se baser sur le

[87] Interpolation réalisée à partir d'une version de démonstration du logiciel SURFER 8.0.

modèle numérique des pentes. Le modèle numérique de terrain a permis la construction de ce modèle numérique des pentes[88]. Afin d'éviter toute déformation, le géoréférencement n'a été réalisé que sur trois points de contrôle[89]. Ces trois points de contrôle ont été ajustés pour obtenir la meilleure superposition possible des représentations des zones de pentes du plan avec le modèle numérique des pentes (fig. 22).

L'emplacement des anciens sondages a ainsi pu être localisé. Cette opération permet d'exclure plus facilement de l'étude les zones perturbées par les fouilles. A l'emplacement des sondages, la végétation est modifiée (fig. 23).

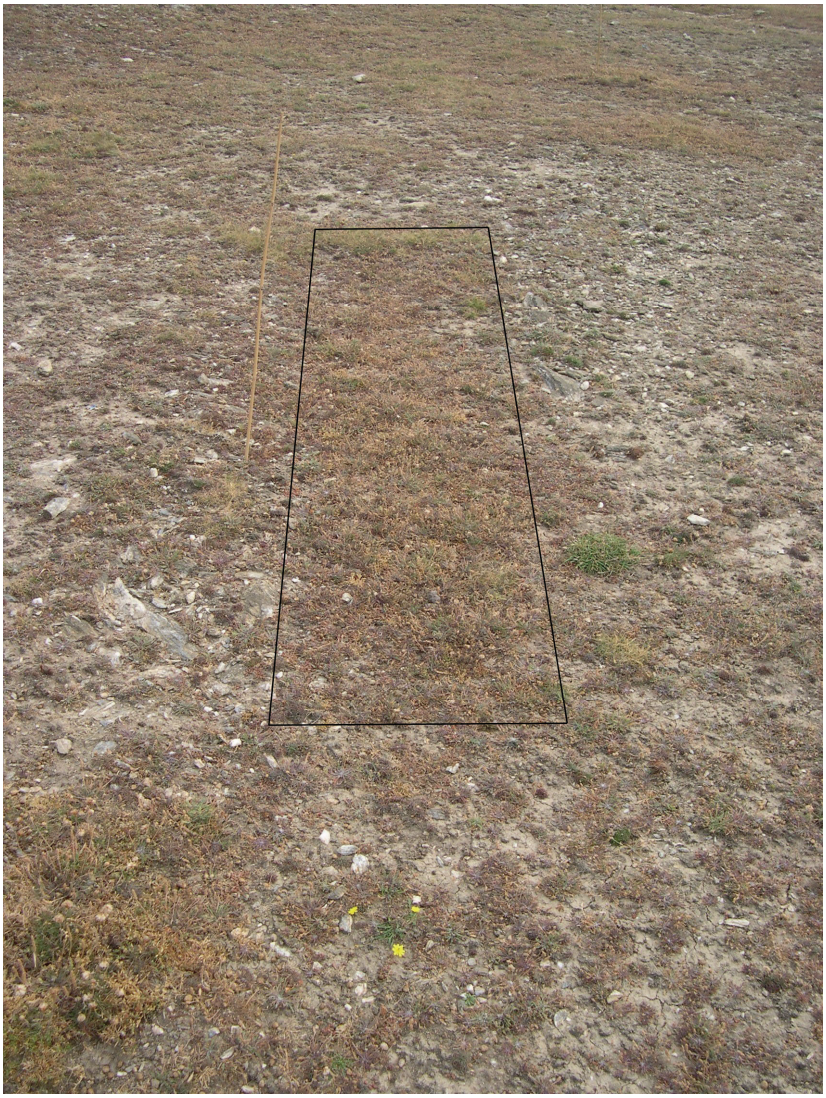


Figure 23 - Exemple d'ancien sondage visible dans la végétation

5.3.2.4 Cartographie géophysique

Au niveau du système de remparts, les différences de végétation observées peuvent en partie être dues à la microtopographie. Cependant dans la partie interne de l'éperon, des différences de végétation apparaissent à des endroits où aucune structure particulière n'a été

[88] Réalisé sous Arcgis 9.x.

[89] Réalisé sous Arcgis 9.x.

repérée en microtopographie. L'analyse archéologique de la mosaïque de végétation de l'intérieur de l'éperon doit donc passer par d'autres méthodes comme la géophysique.

Dans cette optique, deux stagiaires du laboratoire de Géosciences Rennes (UMR 6118) sont intervenus : B. Bohard dans le cadre d'un stage conseillé de licence 3 et O. Henri dans le cadre d'un stage obligatoire de master 1. Le travail a été suivi scientifiquement par F. Nicollin, maître de conférences de ce laboratoire. La phase terrain s'est déroulée sur l'ensemble du mois de mai 2006. L'ensemble des travaux préparatoires (implantation du maillage, relevés topographiques), en plus des relevés géophysiques, à été réalisé par ces stagiaires et moi-même.

- ***Prospection électromagnétique***

Dans un premier temps, une cartographie électromagnétique a été réalisée.

Un EM38 a été loué à la société ABEM France pour réaliser cette cartographie électromagnétique. Cet appareil permet d'estimer la conductivité du sol, par la réponse des ions de la solution de sol, mesurée sous forme de champ magnétique suite à leur exposition à un champ magnétique primaire. L'appareil estime ainsi la conductivité moyenne de la zone de sol atteinte par le champ magnétique primaire. L'appareil possède deux positions. En position verticale, deux bobines créent un champ magnétique primaire explorant les premiers 150 cm du sol. En position horizontale, deux autres bobines créent un champ magnétique primaire explorant les premiers 75 cm du sol.

Des transects est/ouest espacés de 1 m les uns des autres ont été réalisés. La marche le long des transects n'étant jamais régulière, il a fallu recaler spatialement ces transects grâce à des points de repères. Un bouton pression (tracker) associé à l'appareil a permis de saisir des points d'étalonnage tous les quatre mètres, à chaque passage de piquet de carroyage. Suite à des problèmes techniques (soudure défectueuse au niveau du tracker), l'étalonnage des transects n'a pas pu être réalisé.

Un nouveau protocole de mesure a alors été réalisé. Point par point, tous les deux mètres, les conductivités dans le mode vertical et horizontal ont été mesurées. Avec les mesures en point à point, un autre problème est intervenu. En effet, les mesures ont présenté des différences d'un jour sur l'autre. Avant chaque utilisation, l'appareil doit être étalonné. Cet étalonnage de l'appareil n'est pas évident (boutons de réglages très sensibles) et les différences d'étalonnage d'un jour à l'autre sont responsables des différences de mesures observées. Nous ne présenterons pas ces résultats ici car ils sont difficilement exploitables.

- ***Prospection magnétique***

Suite à tous ces problèmes en électromagnétique, il a donc été décidé de ne pas insister avec l'appareil EM38 et de réaliser plutôt une cartographie magnétique. Un magnétomètre à protons de type GSM-19, prêté par le laboratoire de géophysique de Géosciences Rennes, a été utilisé pour effectuer cette cartographie magnétique. Cet appareil mesure l'intensité absolue du champ magnétique terrestre (CMT) au niveau de deux bobines à hydrocarbures. La bobine inférieure donne une valeur d'intensité du champ magnétique total. La bobine

supérieure donne une autre valeur d'intensité de champ magnétique. La différence d'intensité entre les deux bobines est alors divisée par l'espacement entre les deux électrodes[90]. Cette valeur permet de mesurer la perte d'intensité verticale appelée gradient vertical de champ.

Le protocole utilisé à été le même que pour la cartographie électromagnétique. Des transects distants de 1 mètre les uns des autres ont été réalisés. Une première passe a été réalisée en est/ouest puis une seconde en nord/sud. Un tracker inclus dans l'appareil a permis de saisir les points d'étalonnage tous les quatre mètres, à chaque passage de piquet de carroyage. La différence avec l'EM38, vient du fait que l'intensité du CMT varie tout au long de la journée, un étalonnage régulier a dû ainsi être réalisé. Tous les deux transects, à la fin de chaque aller-retour, une mesure au point B0 de cette intensité a été réalisée afin d'étudier sa variation journalière en ce point. Ces points de mesures sont appelés points de diurne. Ils permettent de passer d'une mesure d'intensité absolue du CMT, variable dans le temps en tous points, à une mesure d'intensité relative par rapport à un point fixe (point B0). Cette intensité relative calculée est alors indépendante du facteur temps et permet ainsi d'avoir une approche spatiale.

Une fois les intensités relatives calculées, les transects ont été étalonnés grâce aux points de tracker. L'appareil de mesure intègre directement cette opération. Les données ont ensuite été transférées dans un SIG (Système d'Information Géographique) afin d'être interpolées.

Les cartes d'intensité de champ et de gradient vertical ont ainsi été réalisées. Concernant l'intensité de champ, une séparation des composantes globale et locale a été établie afin d'extraire les anomalies magnétiques de champ (fig. 24).

L'emplacement des deux remparts principaux est clairement visible sur cette carte d'anomalies. Les cinq talus intermédiaires ne se dessinent en revanche pas sur cette carte. Le chemin d'accès orienté nord-ouest/sud-est de la phase 2 mis en évidence par L.M. Threipland est en revanche clairement visible.

De nouvelles structures apparaissent dans la partie interne de l'éperon.

Dans la partie à l'est de l'entrée du rempart interne, deux structures linéaires inédites perpendiculaires à ce dernier et s'y appuyant sont visibles. Une troisième structure linéaire située à l'est en rebord de plateau n'est autre qu'un retour de ce rempart interne. A l'ouest de ces trois anomalies magnétiques linéaires, quatre anomalies ponctuelles alignées suivent cette même orientation nord/sud. Juste au pied du rempart interne, à coté de l'entrée, une anomalie ponctuelle apparaît nettement. Cette anomalie correspondrait peut-être à l'ancien sondage de L.M. Threipland sur le bâtiment circulaire mais peut aussi correspondre à une structure inédite à proximité.

Dans la partie ouest, des structures linéaires nord-ouest/sud-est se distinguent. Ces anomalies suivent le sens de schistosité. Il est donc difficile de leur attribuer un statut archéologique en l'absence de fouilles. Dans cette même partie, quelques anomalies ponctuelles discrètes apparaissent çà et là.

[90] Constant dans l'étude.

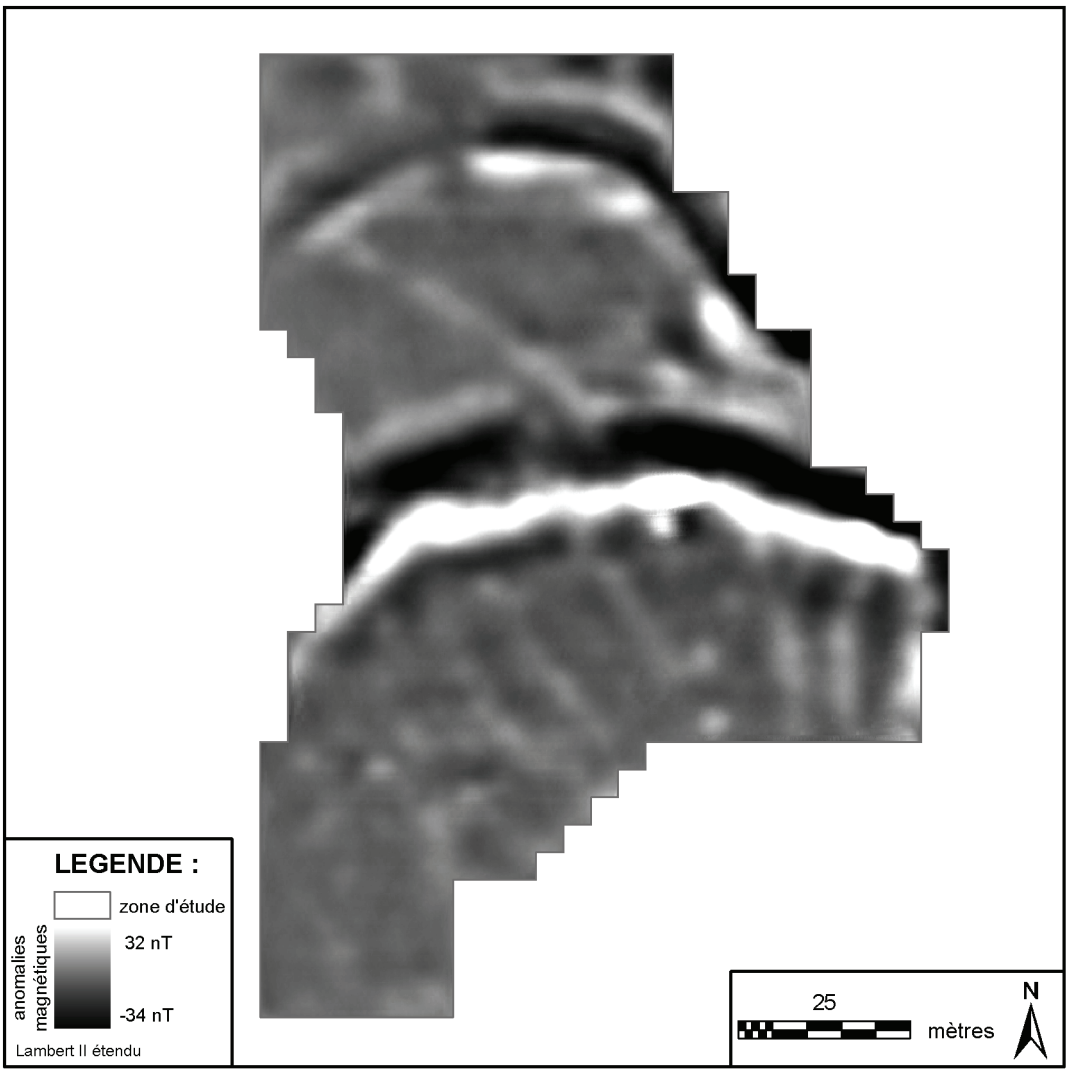


Figure 24 - Anomalies d'intensité du champ magnétique terrestre identifiées

- ***Prospection électrique***

Au niveau de la partie est interne de l'éperon, il a semblé intéressant d'approfondir les mesures au niveau des anomalies linéaires perpendiculaires s'appuyant au rempart interne. Pour cela, une approche électrique a été réalisée. Grâce à elle, la profondeur a été intégrée comme nouvelle dimension. Un Terrameter SAS1000 a été loué à la société ABEM France pour réaliser cette cartographie électrique. Le système d'électrodes a dû, quant à lui, être fabriqué pour l'occasion et pourra être réutilisé éventuellement pour d'autres chantiers. Trois rails de 32 électrodes de 4 mètres chacun ont ainsi été conçus (distance inter-électrode de 12.5 cm).

Des transects est/ouest espacés de deux mètres ont été disposés au niveau des anomalies linéaires perpendiculaires s'appuyant au rempart interne. Le protocole de mesure a été un dispositif de type Schlumberger établi par F. Nicollin pour l'occasion.

Treize transects de 16 à 20 m ont ainsi été réalisés. Il est possible d'après ces transects

d'avoir une vue des variations de conductivité en fonction de la profondeur le long d'un profil (fig. 25). Il est aussi possible pour une profondeur donnée de visualiser spatialement les variations latérales de conductivité (fig. 26).

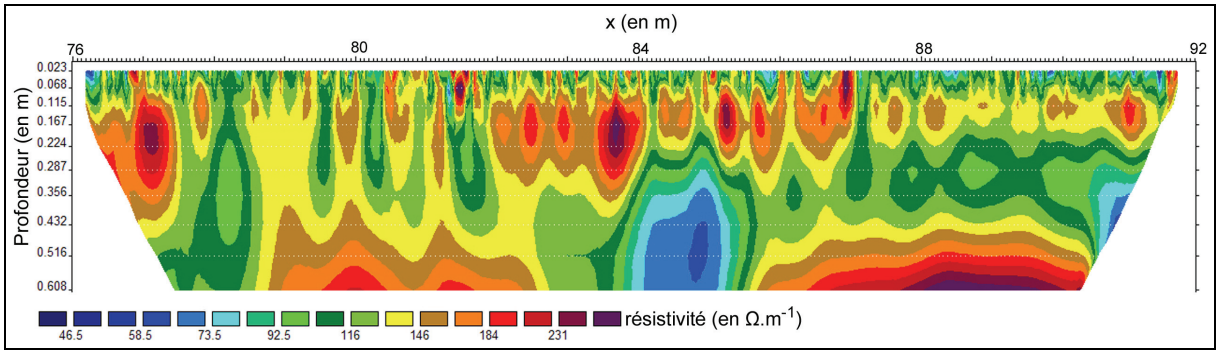


Figure 25 - Exemple de transect obtenu en électrique (transect 7)

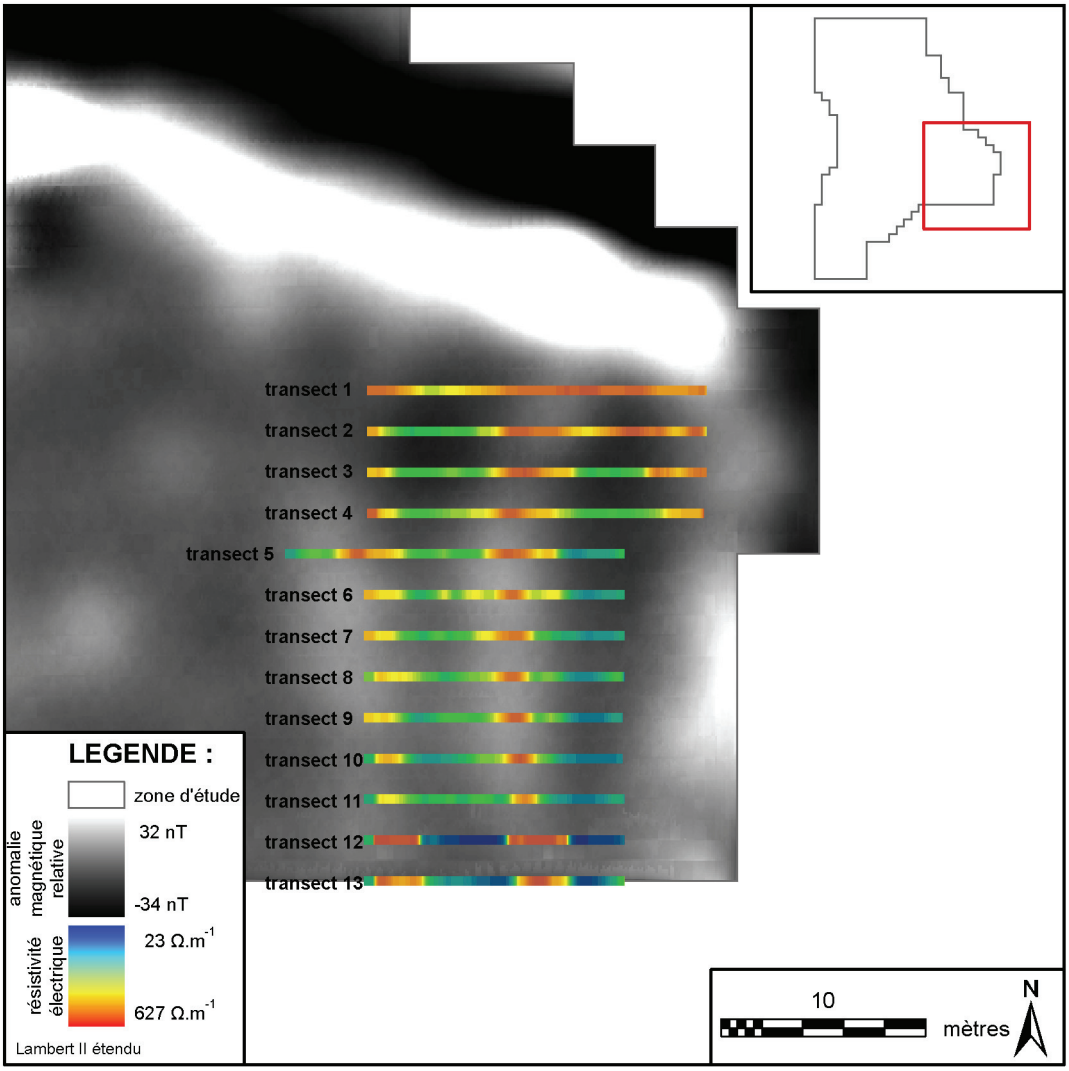


Figure 26 - Exemple de variation latérale de conductivité (profondeur: 61cm)

Au niveau de chaque profil, les anomalies linéaires étudiées sont apparues comme ayant une conductivité assez élevée. Les anomalies n'apparaissent au niveau de ces profils qu'au-

delà des 30 premiers centimètres. Il semble que ces anomalies soient des creusements dans un substrat peu conducteur comblés par un sédiment plus conducteur. Dans le cadre des sondages, ceci permet d'évaluer que les structures doivent apparaître dès ces 30 premiers centimètres. La taille des sondages doit ainsi être évaluée en fonction de cette profondeur d'investigation prévue.

5.3.2.5 Zones d'étude choisies

La surface des sondages doit être choisie en fonction de la profondeur d'investigation pressentie mais aussi en fonction des contraintes légales. Le site est classé monument historique. Les sondages n'ayant pas pour vocation première l'étude archéologique du site, il a été décidé avec le SRA Bretagne de limiter l'étude à environ 30m². Cette surface est facilement sondable par une dizaine de personnes sur deux jours.

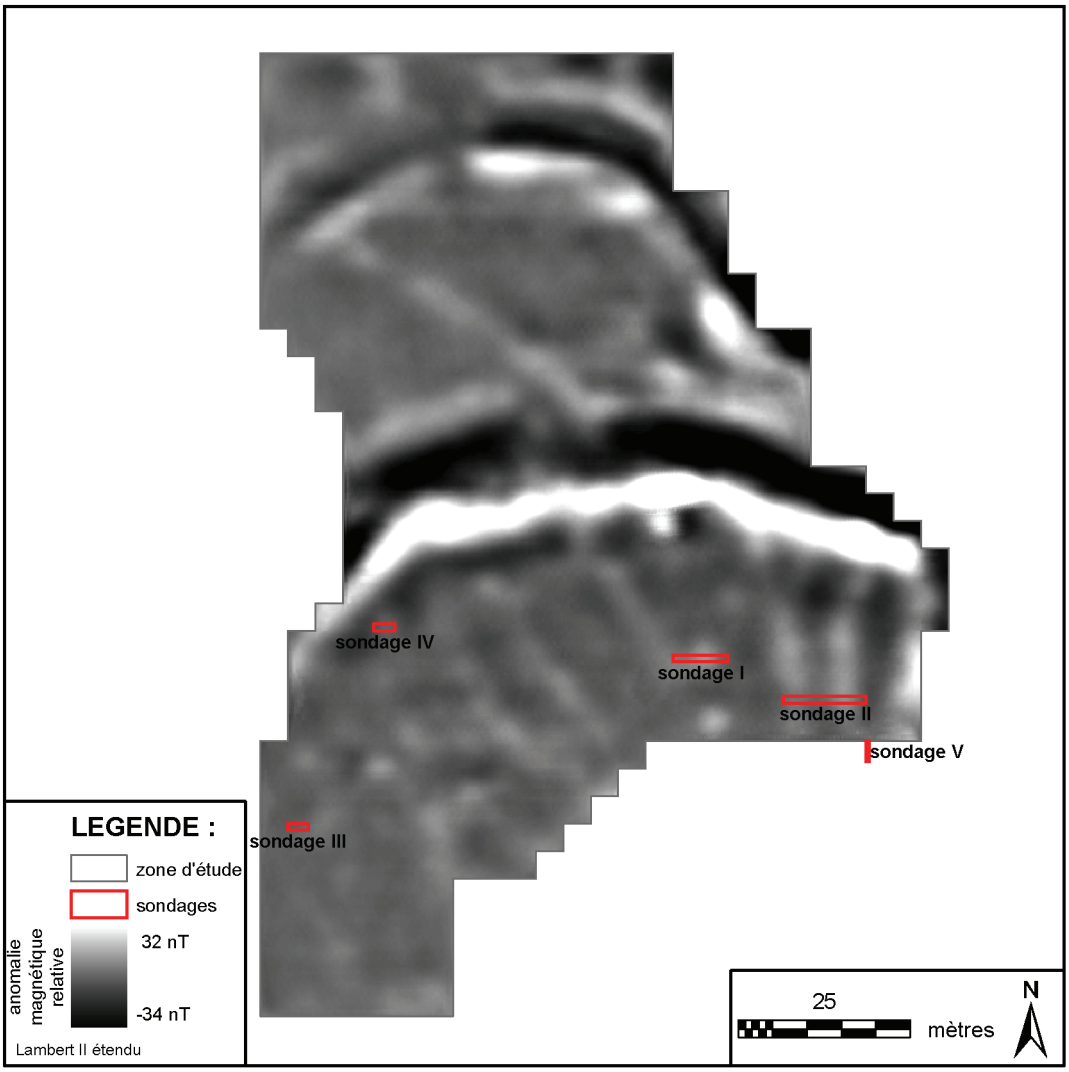


Figure 27 - Emplacement des sondages archéologiques prévus

Il est préférable de découper cette surface en plusieurs sondages. L'emplacement de ces sondages doit être choisi en fonction des anomalies géophysiques repérées. Les anomalies se dessinent surtout au niveau de la carte de composante locale du champ magnétique terrestre

(fig. 24). Cette carte sert alors de base de choix à l'implantation des sondages. Les sondages doivent recouper ces anomalies de façon à avoir environ autant de relevés de végétation sur structures et hors structures. Les transects réalisés nécessitent de mesurer au maximum un mètre de large afin de réaliser le plus grand nombre possible de sondages.

L'emplacement de ces sondages est choisi en fonction des anomalies de végétation repérées. Cinq sondages recoupant des anomalies sont prévus (fig. 27). Un des sondages (sondage III) recoupe une anomalie de végétation sans anomalie géophysique afin de servir de témoin.

5.4 Forêt de Pont-Calleck (Berné, Morbihan)

5.4.1 Présentation

5.4.1.1 Localisation

La forêt de Pont-Calleck se situe au sud-est de la commune de Berné, dans le Morbihan. L'étude couvre trois sites (EA n°560140004, 560140017 et 560140019). Les parcelles concernées sont les parcelles E359, E369 et F631 (sections E1 et F1, cadastre numérisé de 2009) (fig. 28). Les parcelles d'exploitation forestière concernées sont les parcelles 24, 25, 36 et 37 (fig. 29).

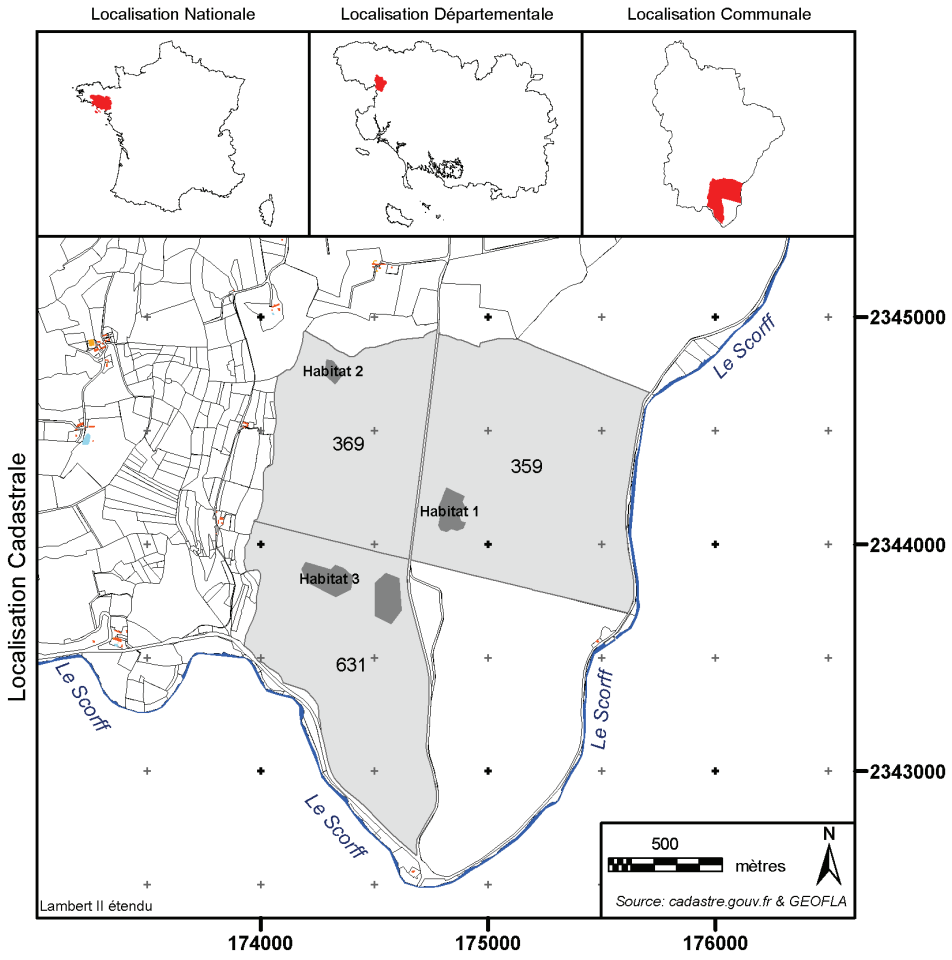


Figure 28 - Localisation cadastrale des sites de Pont-Calleck

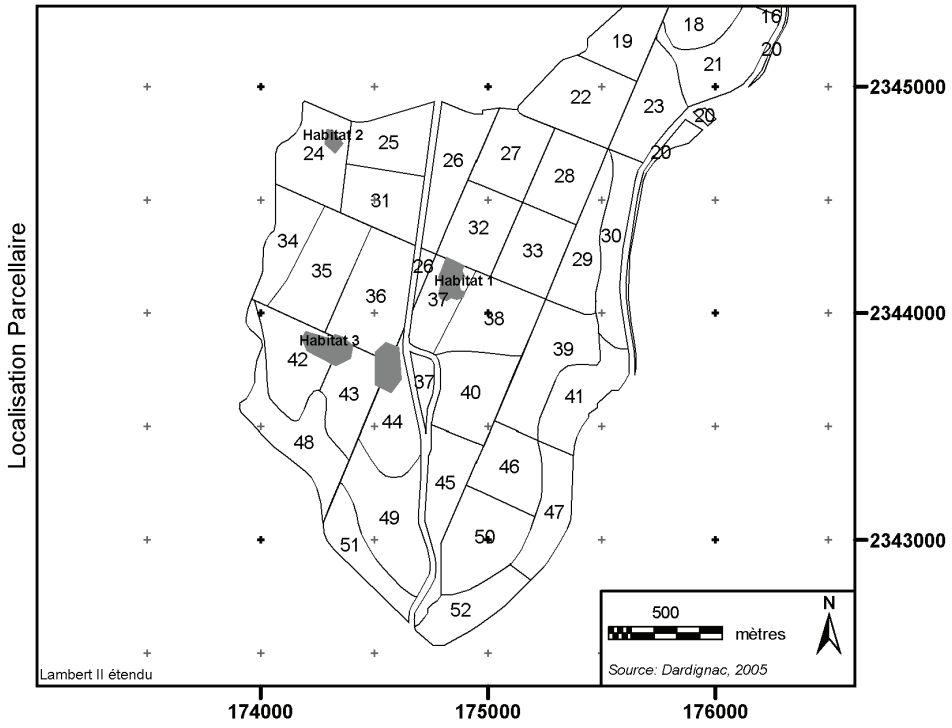


Figure 29 - Localisation parcellaire des sites de Pont-Calleck (*Parcellaire ONF*)

5.4.1.2 Contexte archéologique

Au niveau archéologique, de nombreuses structures ont été trouvées en prospection pédestre par détection d'anomalies microtopographiques dans la forêt de Pont-Calleck.

En 1975, deux tombelles (EA n°560140001) sont repérées dans la partie nord de la forêt par M. Bosshardt, ingénieur de l'ONF (Le Roux, 1975). Une de ces tombelles a été l'objet d'une fouille de sauvetage sous la direction de M. Le Goffic (Le Roux, 1977)[91]. Aucun mobilier n'a permis d'attribuer cette structure à une période chronologique particulière. Un paléosol était scellé par la tombelle. L'étude palynologique de ce sol a permis de repérer que cette structure s'est implantée dans un environnement végétal particulier. La comparaison de cette étude à d'autres faites sur la région permet de supputer une implantation de cette structure pendant l'Age du Bronze final (Morzadec, 1982).

En 1976, trois habitats médiévaux ont été découverts à la suite de coupes forestières (Bardel, 1976). Un de ces habitats (EA n°5601400017) a fait l'objet de fouilles de sauvetage de 1976 à 1980 (Bardel, 1976, 1977, 1978, 1980). Le groupe de bâtiments au nord s'inscrit dans un enclos quadrangulaire. C'est ce groupe de bâtiment qui a été concerné par les fouilles. Un des bâtiments fouillé est accolé à cet enclos. Au niveau du mur de jointure, des artéfacts de la période gallo-romaine ont été découverts. Les éléments parcellaires associés à l'habitat ne sont donc pas forcément médiévaux. Ce parcellaire est peut-être d'origine antique. Sous le

[91] Cette fouille n'a pas fait l'objet d'un rapport : les données de fouille sont néanmoins consultables dans les dossiers communaux du SRA Bretagne.

mur d'un autre bâtiment fouillé a été découverte une fosse remplie de scories. La production métallurgique est donc assez précoce sur le site. Au nord-est du groupe d'habitats, un four a pain a aussi été découvert. Son déblaiement a permis de découvrir son architecture. Parmi les déblais, du matériel d'époque moderne a été découvert. L'abandon du site est donc assez tardif. Après une proposition de valorisation du patrimoine de la vallée du Scorff (Picault, 1993), la partie fouillée de ce site vient enfin de faire l'objet de restaurations pour sa mise en valeur sous la direction de D. Tanguy (Tonnerre, 2008).

En 1987, D. Tanguy décide de réaliser un prospection thématique (Tanguy, 1987). L'Office National de Forêt est sensibilisé au risque de destruction de sites archéologiques lors de travaux forestiers. Mais cette sensibilité ne fait pas tout, il faut que l'ONF connaisse l'existence de ces sites pour mieux pouvoir les préserver. Cette prospection avait entre autres pour objectif de combler ces lacunes pour la forêt de Pont-Calleck. Ces travaux n'ont pu réellement aboutir, D. Tanguy ne pouvait prévoir la venue d'un ouragan d'une rare violence qui ravagea 70% environ de la forêt en octobre 1987. La prospection se révéla alors quasiment impossible. Toutefois, les prospections avant tempête avaient permis de repérer deux enclos et un certain nombre de « tombelles » à proximité du premier (EA n°560140010 et 560140011). Les prospections dans les boisements alentours ont toutefois été moins perturbées. Il en ressort que la concentration des habitats désertés est assez importante autour de la partie sud du massif de Pont-Calleck. Il ne serait donc pas impossible qu'il reste d'autres sites de ce type non découverts dans cette forêt.

Il a fallu attendre 2004 pour que de nouvelles prospections soient réalisées. Celles-ci ont été effectuées par la mission archéologique de l'ONF dans le cadre d'une convention avec le SRA Bretagne (Dardignac, 2005). Participant à ces prospections à titre de bénévole, nous avons cartographié les structures existantes et prospecté les parcelles attenantes. Les structures ont été cartographiées à l'aide d'un GPS centimétrique. Partant de ces structures, de nombreux éléments parcellaires non référencés ont été suivis et cartographiés. En longeant ces talus et terrasses, de nouveaux habitats et des « tombelles » ont été découverts et cartographiés. Ces cartographies précises ont pour mission de définir des zones de protection autour de ces sites quant aux risques de dégâts liés aux passages d'engins de débardage. Lors de ces prospections, de très nombreuses places à charbon ont été détectées. Ces charbonnières sont liées à la forte activité métallurgique locale. De 1824 à 1833 notamment, des hauts fourneaux ont fonctionné le long du Scorff. Les restes d'une de ces forges ont pu être localisés en limite de forêt dans la vallée du Scorff.

5.4.1.3 Contexte environnemental

La forêt de Pont-Calleck se situe sur un plateau bordé, à l'est et au sud, par le Scorff. Ce plateau est entaillé par quelques vallons rejoignant la vallée du Scorff. Leur orientation générale est nord/sud et les pentes sont modérées à fortes (fig. 30).

D'un point de vue géologique, l'ensemble de la forêt se situe sur un granite de type granulite. Quelques filons de quartz orientés nord-nord-ouest/sud-sud-est ont été décelés au

sein de cette granulite. Aucun filon n'est cartographié au niveau de la forêt. Ce genre de milieu est souvent non prospecté et des filons non décelés peuvent exister. Le cisaillement Sud-Armoricain n'est distant que de quelques kilomètres au sud. La limite de ce dernier est notamment caractérisée par la présence de granulites feuilletées. Ce litage a été arrêté -sur la carte- à un kilomètre au sud de la forêt. La déformation des roches est graduelle et rien n'exclut leur feuilletage au niveau de Pont-Calleck. L'incision des granulites par le Scorff a été accompagnée de dépôts d'alluvions. (fig. 30).

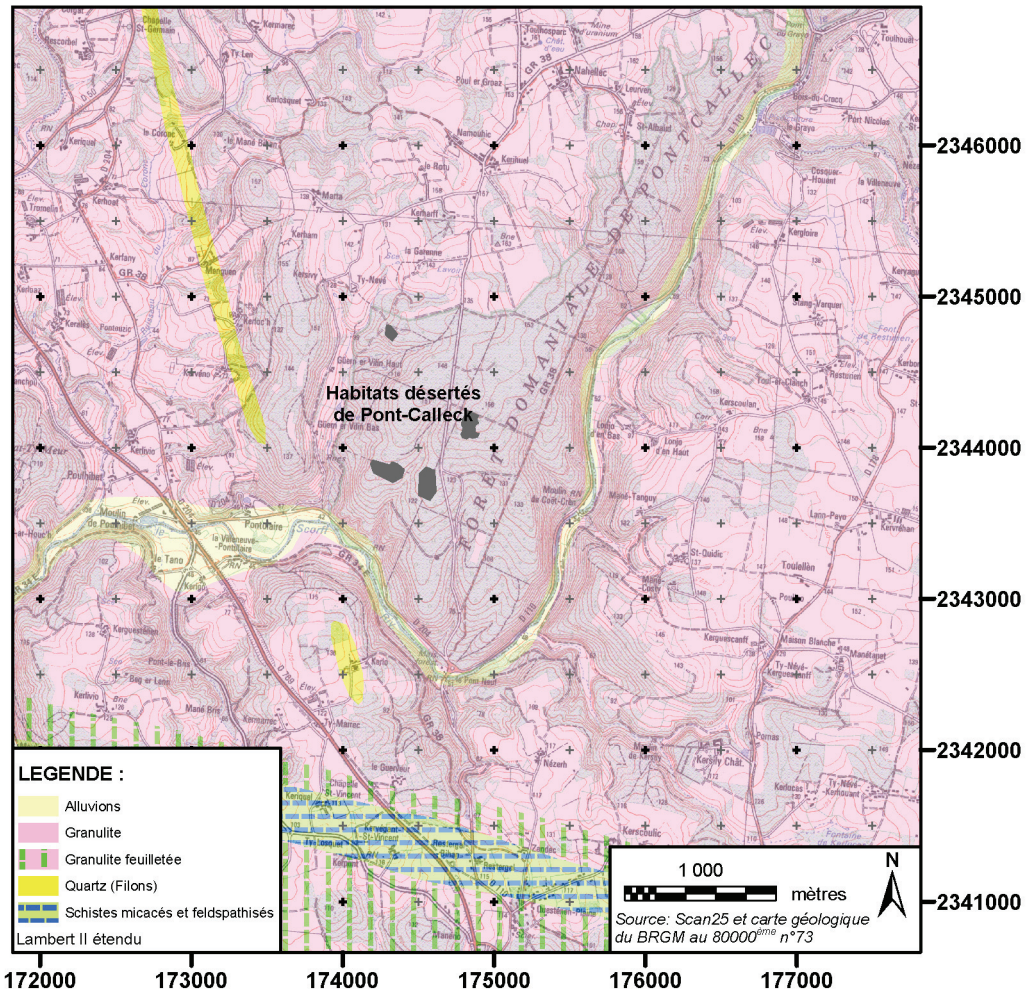


Figure 30 - Environnement géologique de la forêt de Pont-Calleck

La forêt de Pont-Calleck est une forêt domaniale. Elle est gérée par l'Office National des Forêts. La production est essentiellement orientée vers le bois de feu. La majorité des parcelles est gérée en taillis sous futaie. Les essences dominantes sont le chêne et le charme. Depuis quelques décennies, certaines parcelles font l'objet d'une gestion orientée vers la production de fûts. Ces parcelles ont fait l'objet de plantations. Les résineux sont cultivés en majorité avec une dominante pour le pin Douglas. Certains feuillus sont plantés comme le chêne d'Amérique et parfois aussi le hêtre (fig. 31). Les parcelles bordant la vallée du Scorff sont inscrites au terme de site classé vallée du Scorff.

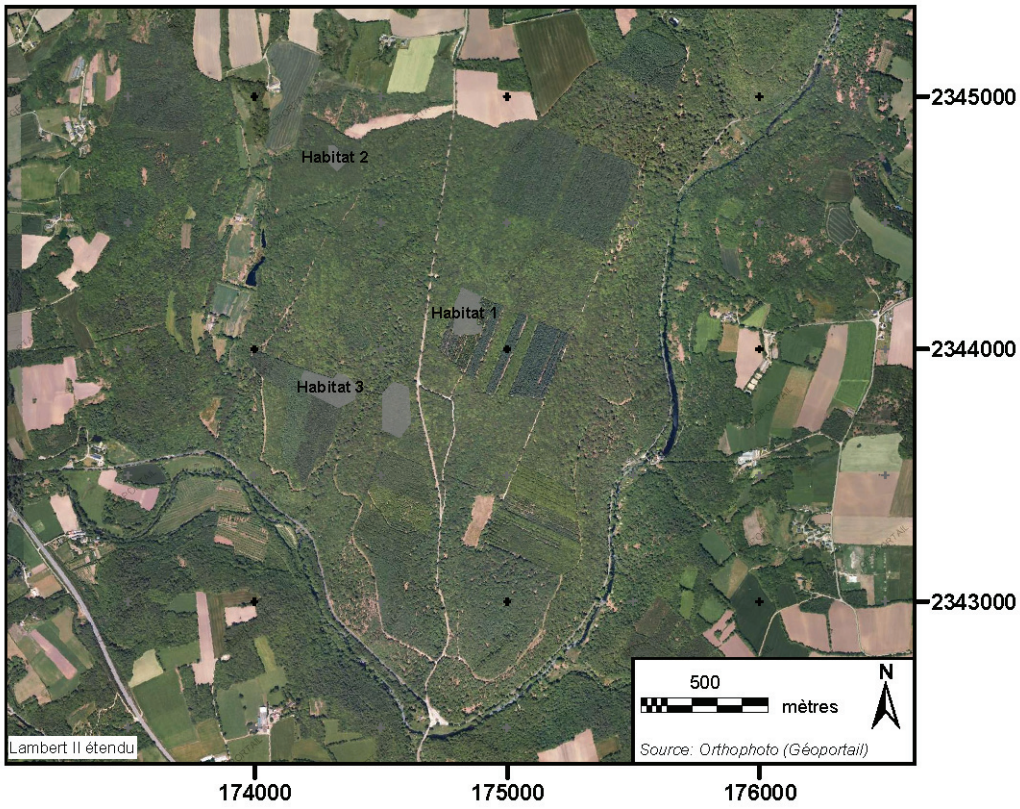


Figure 31 - Orthophotographie de la forêt de Pont-Calleck

5.4.2 Choix des zones d'étude

5.4.2.1 Prospection des pieds de fragon

Pour la forêt de Pont-Calleck, l'étude consiste à réaliser des sondages archéologiques sous des bosquets de fragon petit houx (*Ruscus aculeatus L.)* afin de vérifier le caractère indicateur de cette espèce. La première démarche est de localiser l'emplacement des pieds de cette espèce. Les forestiers avaient depuis quelques temps repéré la présence de *Ruscus* à proximité des habitats médiévaux désertés connus. Une prospection au cours de l'hiver 2004-2005 a été programmée par la mission archéologique de l'ONF. Ma participation à cette prospection a permis, outre la localisation de nouvelles structures, de repérer un certain nombre de pieds de fragons. Ces pieds sont toujours établis à proximité des habitats désertés. Un seul des six groupements d'habitats ne livre pas de fragon. Quelques pieds repérés sont isolés des structures. Un pointage GPS des pieds permet de les cartographier.

5.4.2.2 Choix des sondages réalisables

Une fois ces pieds repérés, il est nécessaire de choisir ceux où les sondages sont réalisables. Certains bosquets de fragon poussent au pied d'arbres. La présence de racines induit une certaine homogénéisation des horizons et perturbe l'interprétation archéologique. La trop forte abondance de racines ralenti aussi fortement la fouille, voir l'empêche. Il est aussi inconcevable de s'attaquer aux racines maîtresses d'un arbre que ce soit du point de vue sécurité que du point de vue du respect de l'environnement. La fouille d'un pied à moins d'un

mètre d'un arbre de forte section ne doit donc pas être envisagée.

Lors de fouilles, les moyens humains sont aussi une contrainte. La durée des fouilles et le nombre de personnes doivent être pris en compte dans l'appréciation des sondages à réaliser.

5.4.2.3 Localisation des sondages

Sept sondages ont été programmés. Les sondages concernent les habitats désertés trouvés par J.-P. Bardel. Ils sont implantés sur les parcelles E359, E369, F631 du cadastre actuel de 2005. Les parcelles d'exploitation forestière concernées sont les parcelles 24, 25, 36 et 37.

Les trois premiers sondages ont été réalisés au niveau du groupe d'habitats numéro 1 (Bardel, 1976). Ils sont tous les trois dans la partie sud (fig. 32). Celle-ci n'a pas été perturbée par les fouilles. Les sondages I (6x6m) et II (2x2m), distants de quelques mètres, sont localisés sur un petit replat entre un bâtiment effondré et un talus. Le sondage III (1x1m) a été installé sur un ourlet de mur de bâtiment potentiel. Ces trois sondages sont situés dans un boisement de type chênaie-charmaie géré en taillis.

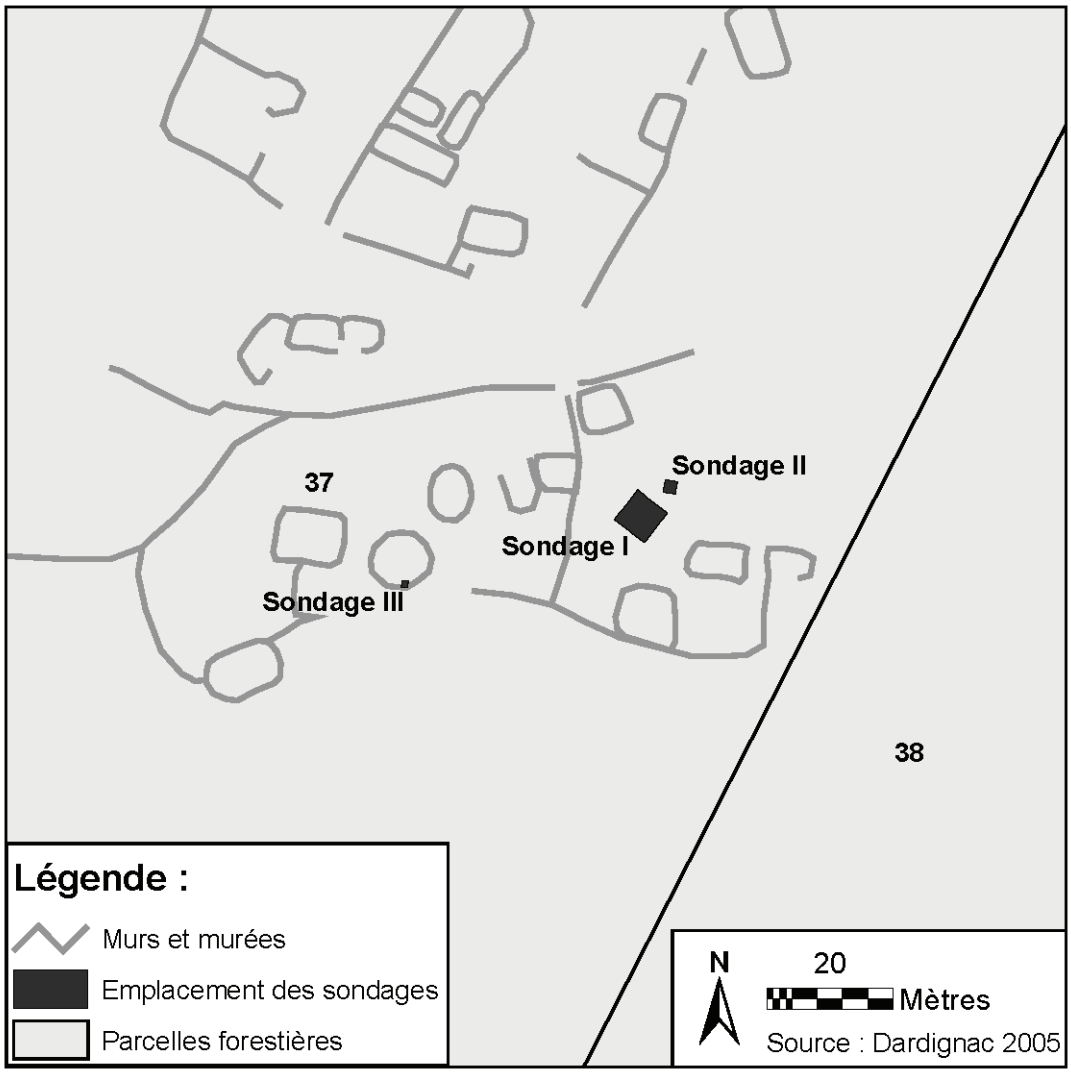


Figure 32 - Emplacement des sondages I, II et III au sein du groupement d'habitats désertés n°1

Le sondage IV (6x4m) a été effectué au niveau du groupe d'habitats numéro 3 (Bardel, 1976). Il est situé à quelques mètres du bâtiment le plus au nord (fig. 34). Ce sondage est aussi en zone de taillis, dominés par le chêne et le charme.

Le groupe d'habitats numéro 2 (Bardel, 1980) a fait l'objet des trois derniers sondages (fig. 33). Le sondage V (2x3m) a été implanté en marge, au nord-est des zones d'habitats. L'ourlet d'une charbonnière est visible à quelques mètres, ainsi que la lisière forestière. Le sondage VI (2x1m) est localisé à quelques dizaines de mètres à l'est de ces zones d'habitat. Le dernier pied de fragon, qui a fait l'objet du sondage VII, est situé sur la rupture de pente, au sud du plateau occupé. Ces trois sondages sont dans une ancienne zone de taillis, mise à blanc aux alentours de 1980. Depuis, la parcelle a fait l'objet d'une plantation en lignes de jeunes plants de hêtre.

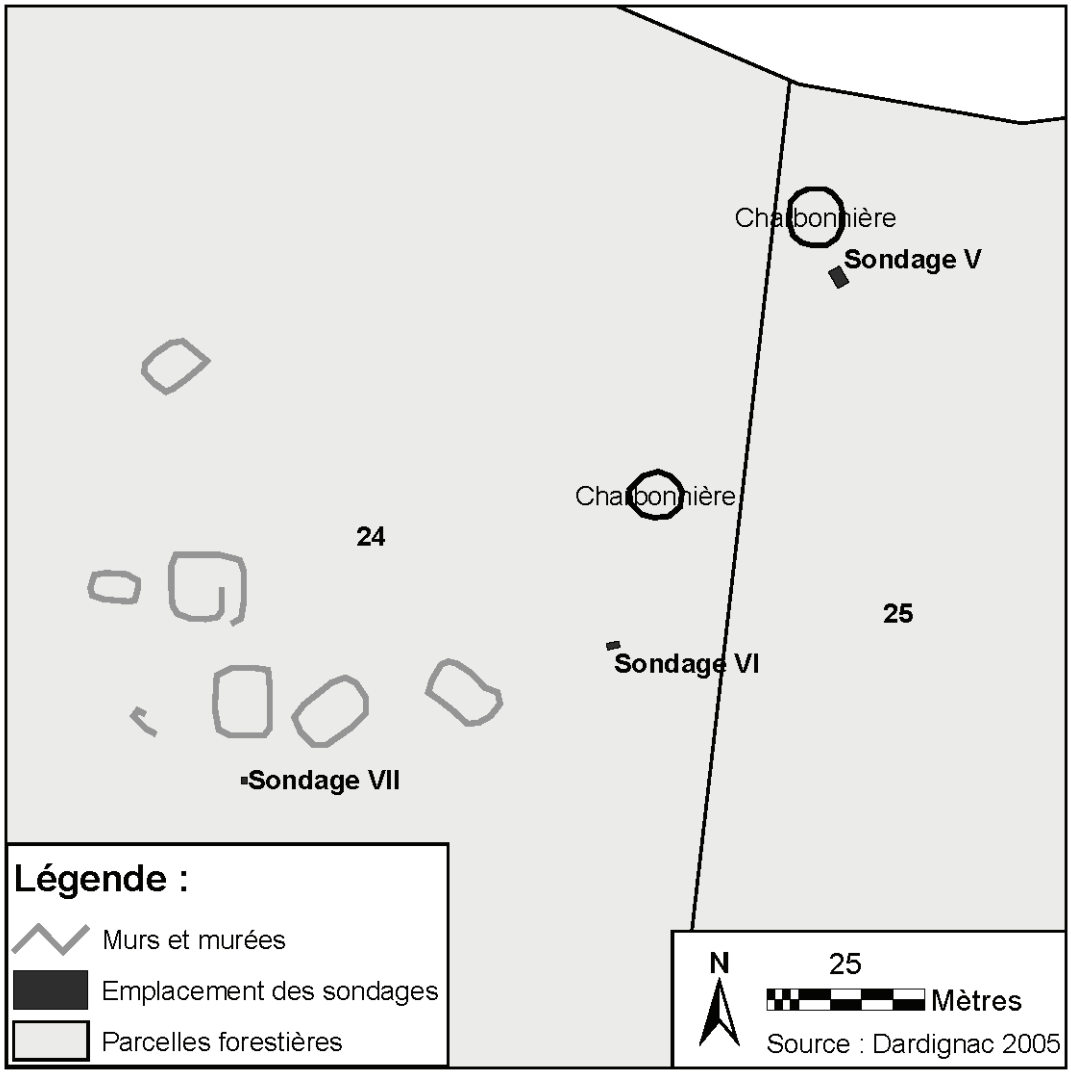


Figure 33 - Emplacement des sondages V, VI et VII au sein du groupement d'habitats désertés n°2

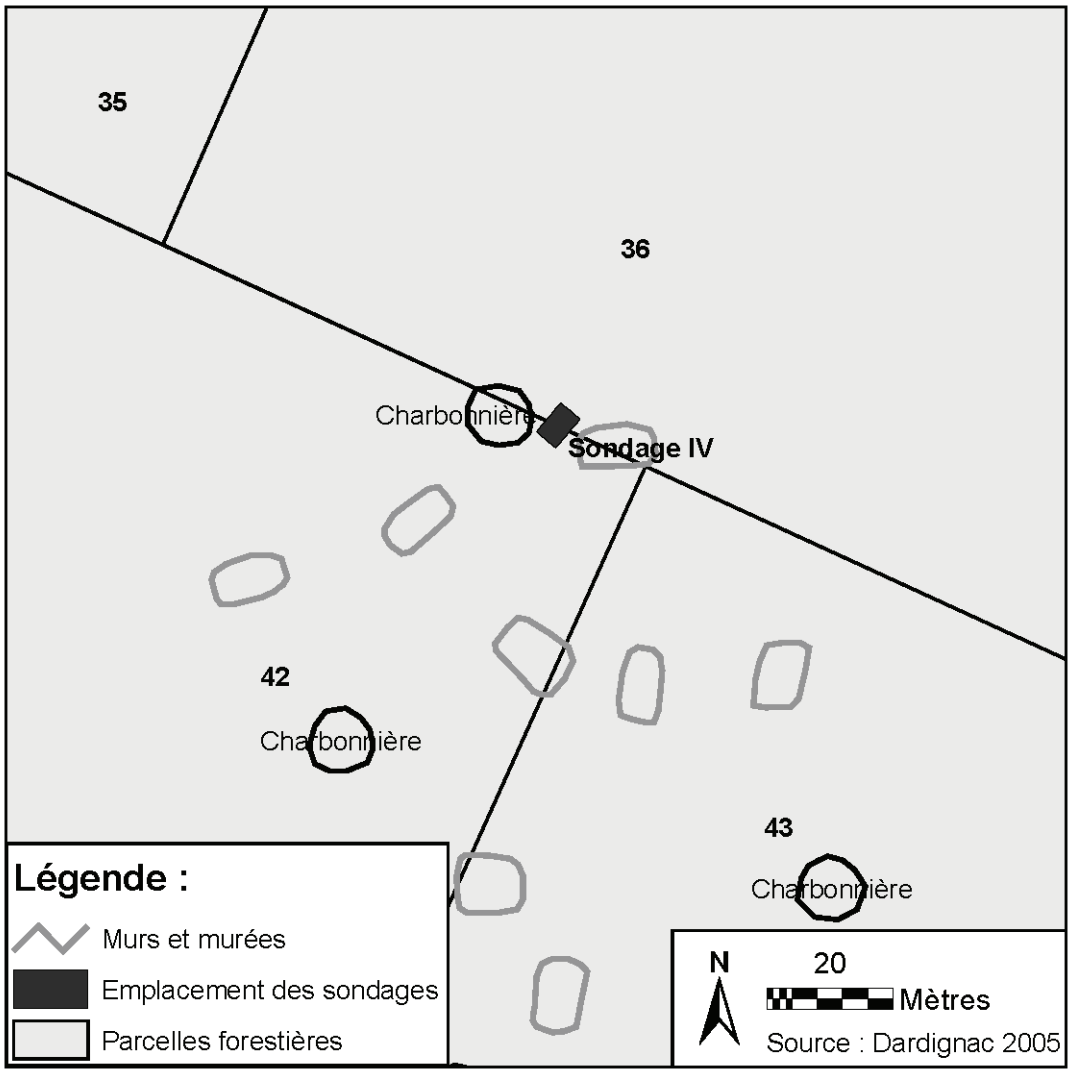


Figure 34 - Emplacement du sondage IV au sein du groupement d'habitats désertés n°3

Résumé

Quatre sites répondant aux critères de choix ont été retenus pour étude. Des milieux naturels différents représentatifs de la région Bretagne ont été choisis : lande, bocage, pelouse littorale, forêt.

Le premier est le site du Goënidou (Berrien, Finistère). C'est un habitat médiéval déserté à la fin du XIV^{e} siècle. La parcelle choisie pour l'étude est un îlot de bâtiments associé à du parcellaire. Il est situé sur une parcelle actuellement en lande de type ptéridaie.

Le deuxième site à avoir été retenu est le site de la Montagne (Visseiche, Ille-et-Vilaine). C'est un site aristocratique médiéval de type enclos abandonné au début du XIV^{e} siècle. Le site est situé dans un milieu de bocage lâche. L'étude porte sur une haie arborée recoupant cet enclos.

La troisième étude porte sur le site de Kervédan (Groix, Morbihan). C'est une pointe rocheuse défendue par un système de remparts composé d'un ensemble de talus et de fossés (éperon barré). Des fouilles anciennes ont attesté un abandon de ce site à la fin de l'Age du

Fer. Des prospections géophysiques ont permis de repérer un bon nombre d'anomalies dans la partie interne de l'éperon associées à des différences de flore. L'étude phytoarchéologique est centrée sur cinq des anomalies floristiques repérées.

La dernière étude porte sur le fragon *Ruscus aculeatus* L.. La zone d'étude choisie est la forêt domaniale de Pont-Calleck (Berné, Morbihan). Des pieds de cette espèce ont été repérés à proximité d'habitats médiévaux désertés. Ces habitats semblent avoir été occupés jusqu'à la période moderne. L'analyse du caractère archéoindicateur du fragon est éprouvée par la réalisation de sondages archéologiques sous sept pieds de cette espèce trouvés dans cette forêt.

Chapitre 6 Méthodologie

Chacun de ces quatre sites étudié a ses propres caractéristiques. La nature des occupations archéologiques est différente. Le milieu végétal des zones d'étude diffère aussi. Il est donc nécessaire pour chaque site de définir un protocole d'étude adapté.

6.1 Etude de la végétation

6.1.1 Nomenclature utilisée

La nomenclature utilisée est celle de l'Inventaire National de Patrimoine Naturel du Muséum National d'Histoire Naturelle[92]. Cette nomenclature s'appuie sur celle initiée par M. Kerguelen (Brisse & Kerguélen, 1994 ; Kerguélen, 1993).

6.1.2 Etude au niveau d'une espèce végétale (site de Pont-Calleck)

Le site concerné par cette étude est celui de la forêt de Pont-Calleck. L'étude classique de la flore forestière se réalise habituellement par relevé de végétation sur des surfaces de 100 à 400 mètres carrés. Sur 400 mètres carrés, la variation des structures archéologiques et des usages actuels peut être très importante. Il est donc plus décisif de ne s'intéresser qu'à la répartition d'une espèce par la cartographie de ses pieds.

6.1.2.1 Implantation des sondages

La phase terrain a commencé par la mise en place du maillage d'étude. Ce maillage est centré sur le « bosquet » ou le pied de fragon. La taille des sondages a été calculée pour avoir au moins autant de surface témoin sans fragon que de surface couverte par le fragon. Par exemple, pour un pied de fragon de 2 mètres de diamètre au sol, une ouverture d'au moins 1 mètre de zone sans fragon a été choisie de chaque coté (au final : maillage de 4 fois 4 mètres). Ce maillage découpe le pied de fragon en quatre parts égales dont deux en quinconce font l'objet des sondages (quarts sud-ouest et nord-est).

6.1.2.2 Orthophotographie

Une fois ce carroyage implanté, chaque mètre carré est photographié à la potence.

Une première passe orthophotographique est faite avant intervention (surface). Elle permet de cartographier de manière précise l'étendue du fragon. Le millet diffus (*Milium effusum*) est lui aussi cartographié quand il est présent. Il est en effet lui aussi souvent considéré comme indicateur d'occupation humaine ancienne.

Sur les quarts sud-ouest et nord-est, la litière est ensuite rapidement enlevée. Les pieds de fragon présents sont coupés à 10-15 centimètres du sol. Chaque mètre carré, litière enlevée, est de nouveau photographié.

Les photographies sont ensuite redressées sous Didger 3.0 avant d'être ouvertes sous ArcGIS.

[92] Cf. http://inpn.mnhn.fr/inpn/fr/download/Taxref_flore.htm.

6.1.2.3 Photo-interprétation

Les photographies servent ensuite de base à l'interprétation. La digitalisation des orthophotographies est réalisée sous Arcgis. Cette digitalisation permet de dessiner les contours d'un objet visible sur la photographie et de lui assigner des attributs. Une carte précise de l'implantation des pieds de fragon est ainsi réalisée. L'étendue de ses racines et l'implantation des pieds de millet sont de la même manière cartographiées.

6.1.3 Etude de la végétation ligneuse (site de la Montagne)

Pour les milieux fermés, la réalisation classique de relevé phytoécologiques n'étant pas adaptée, il est intéressant d'étudier la répartition des pieds des espèces ligneuses.

Le site de La Montagne est recoupé par une haie arborée. L'étude classique d'une haie se réalise habituellement par relevé de végétation sur des tronçons de 30 mètres (Perrein, 1987a). Sur 30 mètres, la variation des structures archéologiques et des usages actuels peut être assez importante. Dans notre cas, il est donc plus intéressant de ne relever que la végétation ligneuse par cartographie des pieds.

6.1.3.1 Cartographie ponctuelle des pieds

La haie concernée par l'étude peut être considérée comme un transect. Un décamètre est pour cela déroulé le long de la haie à partir de l'extrémité est de la haie (point de repère NR1).

Les pieds des espèces ligneuses sont alors cartographiés sur cette ligne en utilisant la distance à NR1 d'est en ouest. Les valeurs de distances sont arrondies au décimètre près. Pour le prunellier, le merisier et le genêt, il n'est pas possible de localiser chaque pied. Ces espèces forment des fourrés composés par un grand nombre de pieds. Elles doivent donc être exclues de l'étude.

6.1.3.2 Spatialisation des données

Chaque observation de terrain recueillie est caractérisée par un nom d'espèce et une distance à NR1. Les relevés ayant été réalisés d'est en ouest, les valeurs entrées sont négatives. Une table regroupant ces observations a été créée dans un tableur et ouverte dans ArcGIS. Pour spatialiser ces données, un thème de points est créé à partir de cette table. Les valeurs utilisées en ordonnées sont les valeurs de distances et l'abscisse 0 est attribué à chaque observation. Le thème ainsi créé n'a pas de projection (système cartésien relatif) et a pour unité le mètre. Il permet de représenter la répartition des pieds de chaque espèce ligneuse au sein de la haie.

6.1.4 Etude de la flore vasculaire

Les sites du Goënidou et de Kervédan sont dans des milieux naturels assez ouverts sans strate arborée. L'aire minimale de relevés de végétation y est réduite. Il a donc été choisi d'utiliser la méthode de relevés sur l'ensemble de la flore vasculaire[93] pour ces sites.

[93] Espèces végétales évoluées possédant des vaisseaux : ptéridophytes (fougères), gymnospermes (conifères) et angiospermes (plantes à fleurs).

6.1.4.1 Implantation d'un carroyage

Il a été décidé de réaliser une cartographie précise de la végétation par la réalisation de relevés contigus. Avant de relever la végétation, il a été nécessaire d'implanter un maillage.

La taille de la maille doit être choisie pour avoir une surface de relevés approchant l'aire minimale (Cf. 4.1.2.1). Cette aire minimale est d'environ 2-3 m² pour le site du Goënidou et d'environ 1 m² pour celui de Kervédan (fig. 35).

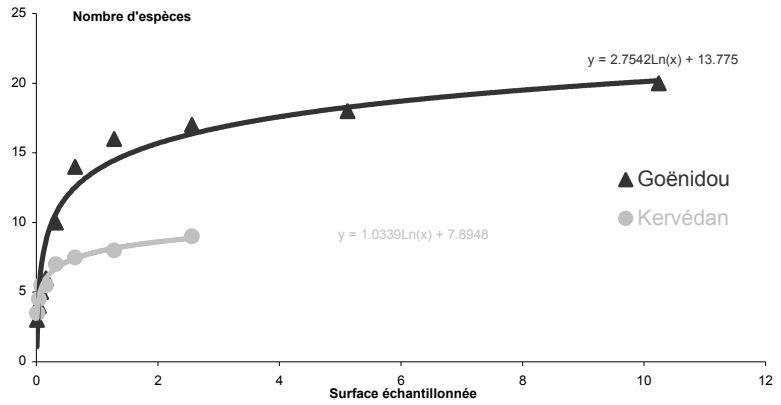


Figure 35 - Courbes aires-espèces des sites du Goënidou et de Kervédan

Pour le site du Goënidou, il a été décidé de comparer la végétation avec une analyse micro-topographique de la parcelle. La surface retenue pour permettre d'avoir une bonne variabilité archéologique est d'environ un quart d'hectare. Une taille de relevés de 2 à 3 m² est donc très faible au regard de cette surface et entraînerait la réalisation d'environ 1000 relevés. Afin d'obtenir un nombre de relevés plus raisonnable à réaliser, leur surface doit être augmentée. Une maille de 2.5 m (relevés de 6.25m²) semble adéquate et réduit le nombre de relevés à un peu plus de 300.

Un carroyage lâche de quarante mètres sur cinquante d'une maille de dix mètres a été réalisé à la lunette de chantier. Un sous-carroyage de 2.5m de maille a ensuite été développé au décamètre (fig. 36)[94].

Pour le site de Kervédan, il a été décidé de fouiller systématiquement les relevés de végétation. La fouille étant un processus destructif, l'étude est limitée à environ 30m². Une surface de relevés de 1m² est donc beaucoup trop élevée au regard de l'étude. Un corpus d'une trentaine de relevés est en effet assez faible au point de vue statistique. Afin d'obtenir un nombre de relevés plus conséquent, leur surface doit être diminuée. Une maille de 0.5m (relevés de 0.25m²) est plus adéquate et augmente le corpus à un peu plus de 100.

Les carroyages de relevés ont été développés à partir du maillage préexistant utilisé pour les analyses topographiques et géophysiques (Cf. 5.3.2). Les sous-carroyages de 0.5 mètres de maille ont été développés au décamètre. Le développement des carroyages a été réalisé en utilisant les notions d'alignements et de prolongations (fig. 37).

[94] Ce carroyage a été implanté avec l'aide de M. Batt, C. Jablonski et G. Perrin.

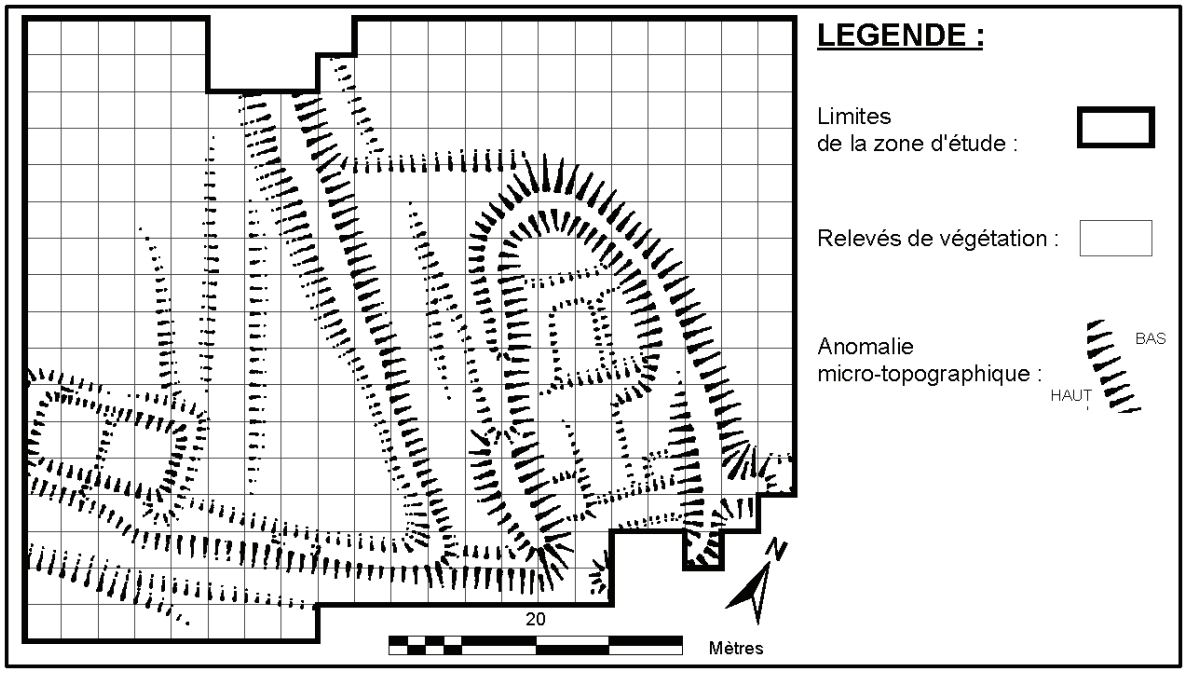


Figure 36 - Carroyage utilisé pour la réalisation des relevés de végétation du site du Goënidou

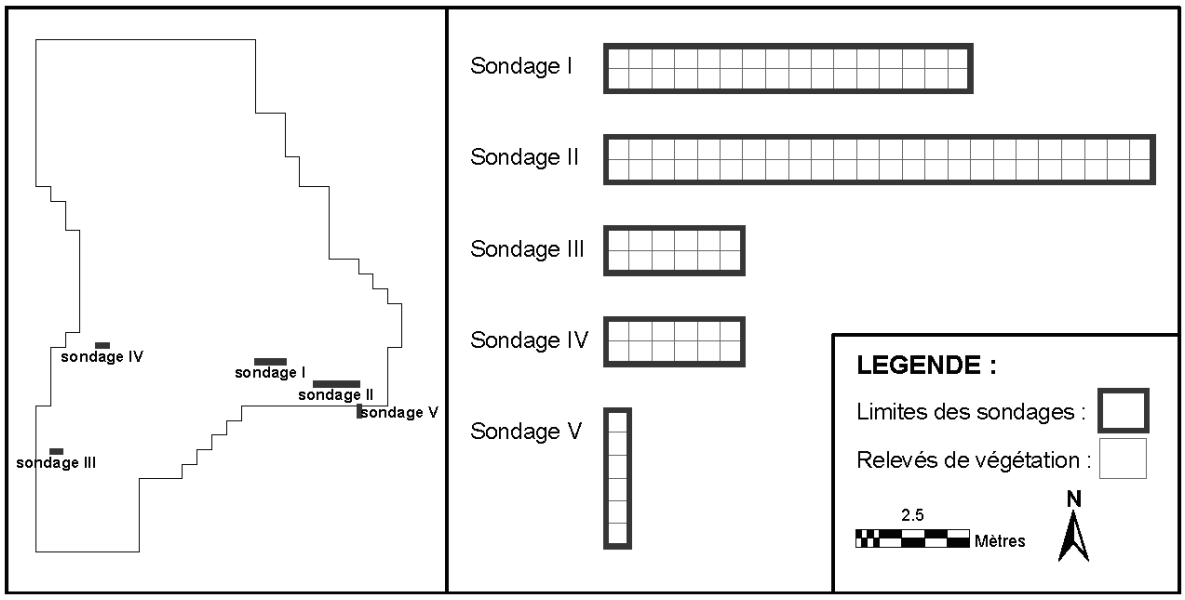


Figure 37 - Carroyages utilisés pour la réalisation des relevés de végétation du site de Kervédan

6.1.4.2 Relevés de végétation

Pour le site du Goënidou, les relevés ont été réalisés fin printemps 2005 (du 31 mai au 18 juin). Sur ce site, la présence d'espèces vernales semblant répondre aux structures a motivé la réalisation des relevés assez tôt dans la saison de végétation.

Concernant le site de Kervédan, les relevés ont eu lieu courant été 2006 (du 4 au 14 juillet). La présence de graminées semblant répondre aux structures a nécessité d'attendre la floraison de ces espèces pour réaliser les relevés.

L'étude a pour vocation d'aider les archéologues à découvrir des sites ou de les interpréter

via la végétation. La détermination des mousses fait souvent appel à l'utilisation de loupes et est affaire de spécialistes. Pour cette raison, il a été décidé de ne pas relever la strate muscinale et de ne s'intéresser qu'à la flore vasculaire.

Chaque carré de relevé a fait l'objet d'un inventaire des espèces végétales présentes. Pour chaque espèce a été attribué un coefficient d'abondance/dominance suivant les recommandations de J. Braun-Blanquet (Braun-Blanquet, 1964)[95] :

- **. :** 1 individu isolé
- **+ :** recouvrement insignifiant (2 à 9 individus)
- **1 :** <5% de recouvrement (ou plus de 10 individus)
- **2 :** de 5 à 25 % de recouvrement
- **3 :** de 25 à 50 % de recouvrement
- **4 :** de 50 à 75 % de recouvrement
- **5 :** > 75 % de recouvrement

Pour le site du Goënidou, la fougère aigle est omniprésente. Elle n'était qu'en début de pousse au moment des relevés de végétation. Cette espèce pousse très vite. Il n'a pas été possible d'estimer son abondance/dominance comme pour les autres espèces. Il y aurait eu un décalage net des abondances estimées entre les premiers et les derniers relevés. Elle n'a pour cela pas été inclue dans les relevés. Il a fallu attendre la fin de croissance de cette espèce pour en réaliser l'étude. Celle-ci a dû se faire au mois d'août. La fougère étant alors très développée, il n'a pas été possible d'estimer son abondance par les coefficients de Braun-Blanquet. Ils auraient été de 5 dans la quasi-totalité des relevés. Il a alors été décidé de réaliser des mesures biométriques. Pour chaque relevé, le nombre de frondes a été comptabilisé. Leur hauteur maximale a été mesurée. Puis après avoir coupé toutes les frondes au niveau du sol, la biomasse fraîche a été mesurée. Pour chaque relevé, la masse moyenne d'une fronde a été calculée en rapportant cette masse au nombre de frondes.

6.1.4.3 Relevés orthophotographiques

Pour le site de Kervédan, la fouille a détruit l'information concernant la répartition des essences au sein des relevés. Pour conserver au mieux cette information, une campagne préalable de photographies verticales de chaque relevé a été réalisée. Les photographies ont été réalisées à l'aide d'un appareil photo numérique fixé sur une potence. Les relevés de ce site concernent de faibles surfaces. Une photographie numérique en bonne résolution d'un relevé permet donc d'identifier assez bien les espèces. Un pixel correspond à environ 0.5mm sur le terrain.

Pour le site du Goënidou, la surface d'un relevé est un peu trop importante pour procéder à ce genre de relevé. En effet avec un appareil photo numérique classique, l'absence de grand angle nécessiterai d'utiliser une très grande potence pour photographier l'ensemble d'un relevé. Or plus la hauteur augmente plus il devient difficile d'effectuer des photographies convenables (flou dû au balancement de l'appareil photo, nécessité d'utiliser un appareil avec

[95] Ouvrage non consulté cité par de nombreux auteurs.

déclencheur infrarouge à distance, difficultés de levage de la perche…). Aucune fouille n'ayant été prévue, il n'a donc pas été nécessaire de photographier les relevés un à un.

Tous les relevés étant contigus, il est toutefois possible de réaliser une photographie d'ensemble. Pour cela, une mission aérienne a été programmée le 17 avril 2007. Le vol a été réalisé à bord d'un Cessna[96] piloté par P. Guigon en compagnie de M. Batt. Cette mission a été réalisée en début de saison avant la repousse annuelle de la fougère aigle (*Pteridium aquilinum*) et a permis d'observer la répartition de la végétation herbacée sur l'ensemble de la zone. Des photographies en basse altitude ont été réalisées. La présence des piquets du maillage au sol autorise le redressement des clichés sous le logiciel Didger 3.0.

6.1.4.4 Constitution de la base de données des relevés

- ***Structure de la base de données***

Pour la saisie informatique des relevés, une base de données VEG est développée sous MS-Access (fig. 38). La base étant la même pour les deux sites et étant susceptible d'être utilisée dans le futur pour d'autres sites, un numéro unique de relevé est créé pour chaque nouveau relevé. Ce numéro est stocké dans la table « Releve » associé au nom du site et au numéro du relevé donné sur le terrain. Une table « Site » stocke les données inhérentes à ceux-ci. La table « INPN_valides » héberge les noms admis de l'ensemble des espèces végétales de la flore vasculaire française. La table « INPN » héberge l'ensemble des noms synonymiques de ces espèces végétales. La table « Observation » permet d'associer à chaque relevé les espèces inventoriées et les indices d'abondance/dominance associés. Les indices d'abondance/dominance et leurs équivalents sont stockés dans la table « Indice A/D ».

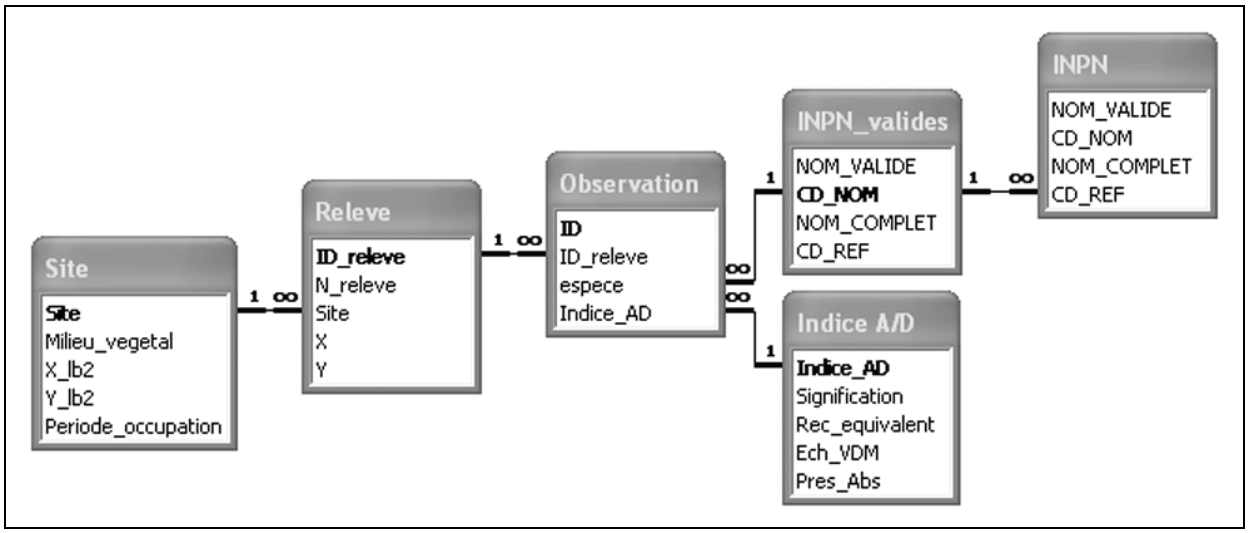


Figure 38 - Structure de la base de données VEG

- ***Construction de la table relevés-espèces***

La saisie des données de terrain s'opère donc sur plusieurs tables. Afin d'obtenir un tableau relevés-espèces facilement exploitable, il est nécessaire de réaliser une requête. Les

[96] Avion à ailes hautes (pas de gêne des ailes pour les prises de vue).

tables « Releve », « INPN_Valides » et « Indice A/D » doivent chacune fournir des données pour la création de cette nouvelle table. La requête utilisée pour cela sous MS-Access est une requête analyse croisée. Les numéros de relevés (« N_releve ») de la table « Releve » sont choisis comme identifiants de lignes de la table requête. Les variables en colonnes sont les noms d'espèces inventoriées (« NOM_COMPLET ») de la table « INPN_valides ». Les valeurs pour chaque couple ligne-colonne sont données par la table « Indice A/D ». La requête est réalisée en utilisant les correspondances numériques de l'abondance/dominance des espèces suivant les préconisations de E. Van der Maarel (Van der Maarel, 1979) stockées dans la colonne « Ech_VDM » de la table « Indice A/D ».

Une requête par site est réalisée en mettant comme critère le nom du site choisi. Comme ces requêtes ne sont pas des tables, des requêtes création de tables sont effectuées afin de transformer ces requêtes en tables.

- ***Caractérisation des relevés en termes de diversité***

Les relevés peuvent bien entendu être analysés en termes de biodiversité. La plus simple manière d'aborder la diversité d'un relevé est de comptabiliser le nombre d'espèces de ce dernier. C'est la mesure de la richesse spécifique.

Chaque espèce occupe une place différente au sein d'un relevé. Certains relevés vont avoir une espèce dominante et beaucoup d'espèces accompagnatrices. Dans d'autres relevés, chaque espèce peut avoir une occupation quasi-similaire de l'espace. Dans ce cas, les relevés sont plus équilibrés. La diversité y est plus forte. Il n'y a pas une espèce écrasant les autres. Cette deuxième approche de la biodiversité peut être quantifiée par l'indice de diversité H de Shannon-Wiener (Shannon & Weaver, 1949). Celui-ci est normalement calculé comme suit :

$$H' = -\sum_{i=1}^{n} pi \log_2(pi)$$

Où *pi* est la proportion du nombre d'individus de l'espèce *i* par rapport au nombre total d'individus du relevé.

N'ayant pas d'individus mais des abondances/dominances, il a été nécessaire d'adapter ce calcul. Les recouvrements équivalents en pourcentages ont été utilisés. Il a été décidé d'utiliser ces derniers et non pas les indices de Van der Maarel. En effet, ces indices donnent plus d'importance aux espèces faiblement représentées. L'utilisation des recouvrements équivalents a donc plus de chance d'être plus proche de l'indice de diversité H de Shannon-Wiener calculé sur les nombres d'individus. Le calcul final est le suivant :

$$H'' = -\sum_{i=1}^{n} pi \log_2(pi)$$

Où *pi* est la proportion de la valeur de recouvrement de l'espèce *i* par rapport à la somme des recouvrements de l'ensemble des espèces du relevé.

Cet indice de Shannon-Wiener a toutefois des limites. Il est fortement dépendant du

nombre total d'individus du relevé. Il n'a donc pas de limite supérieure. Il varie de 0 à *n*. La pondération par le nombre total d'individu permet d'obtenir l'indice d'équitabilité J de Pielou. La formule de calcul est :

$$J' = \frac{H'}{H'\max} = \frac{-\sum_{i=1}^{n} pi \log_2(pi)}{\log_2 S}$$

Où *pi* est la proportion du nombre d'individus de l'espèce *i* par rapport au nombre total d'individus du relevé et *S* le nombre total d'individus du relevé.

Comme pour l'indice de Shannon-Wiener, cet indice doit être adapté à des données en abondance/dominance. Les recouvrements équivalents sont utilisés. La formule de calcul est la suivante :

$$J'' = \frac{H''}{H''\max} = \frac{-\sum_{i=1}^{n} pi \log_2(pi)}{\log_2 S}$$

Où *pi* est la proportion de la valeur de recouvrement de l'espèce *i* par rapport à la somme des recouvrements de l'ensemble des espèces du relevé et *S* cette somme.

Ces trois indices sont calculés dans la base à l'aide de requêtes.

- ***Spatialisation de la base de données***

Afin de procéder à l'analyse spatiale des données, celles-ci doivent être entrées dans un logiciel de Système d'Information Géographique. Le SIG utilisé dans notre étude est le logiciel ArcGIS. Ce logiciel gère des calques d'informations spatiales appelés thèmes. Un thème peut être en mode vecteur (points, lignes, polygones) ou raster (image). Que ce soit en mode vecteur ou raster, des attributs sont associés à chaque entité spatiale (point, ligne, polygone ou pixel). Chaque thème est donc constitué d'une table dont chaque ligne fait référence à un élément graphique.

Les relevés sont disposés suivant des maillages carrés. A l'aide de la fonction *create vector grid* de l'outil *Hawth's tools*[97], ces maillages sont créés dans des thèmes de polygones. Il suffit de définir les coordonnées relatives de la zone d'emprise du maillage et la taille de la maille. Pour chaque polygone créé, les numéros de relevés de végétation donnés sur le terrain sont ensuite saisis dans la table attributaire.

Une connexion est ensuite réalisée entre ArcGIS et la base de données MS-Access. Les tables créées à l'aide de requêtes dans la base de données sont ouvertes dans le SIG. Ces tables sont alors liées aux thèmes de maillages respectifs par une jointure sur le numéro de relevé. Il est alors possible de représenter cartographiquement les abondances des espèces mais aussi les indices de biodiversité calculés.

[97] Téléchargeable sur http://www.spatialecology.com/.

6.2 Etude de l'écologie des espèces

Chaque espèce possède des caractéristiques écologiques propres et a une réponse particulière vis-à-vis des différents facteurs du milieu (Cf. 3.2.3.2). Certains auteurs ont réussi à quantifier les réponses des espèces à ces facteurs par des indices.

Pour chaque relevé, il est possible d'étudier la proportion d'espèces répondant à une caractéristique écologique particulière. Il est aussi envisageable d'établir un indice moyen pour chaque facteur en fonction de la composition floristique de ce relevé. Ces proportions et ces indices moyens permettent de caractériser le milieu au niveau du relevé en l'absence de mesures des variables du milieu. Cette discipline s'appelle la bioindication et s'appuie sur l'écologie des espèces.

Pour des études sur l'ensemble de la flore vasculaire (Goënidou et Kervédan), l'écologie des espèces peut donc être intégrée. Ceci permet de s'affranchir des espèces et de comparer des sites sur les mêmes indices alors qu'il n'y a pas d'espèces communes. Ces données sont intégrées à la base de données des relevés VEG existante. Cette base étant spatialisée, les indices de bioindication des relevés ont aussi une dimension spatiale.

6.2.1 Caractéristiques écologiques des espèces utilisées

Chaque espèce a des caractéristiques particulières. Ces caractéristiques sont des variables qualitatives.

- **Statut des espèces**

Les espèces peuvent naturellement être autochtones d'une région. Elles peuvent aussi avoir été importées par l'homme. Cet apport peut avoir été réalisé anciennement (archéophytes), récemment (néophytes) voire très récemment (allochtones occasionnelles). Dans ce dernier cas, l'espèce en question ne s'est pas encore acclimatée et peut s'éteindre aussi vite qu'elle est apparue. Certaines espèces peuvent aussi avoir un statut douteux. Bien sûr, d'autres espèces sont parfois aussi non renseignées.

Il n'existe pas de base recensant ces statuts pour l'Ouest de la France. En France, les statuts n'ont pour l'instant été déterminés qu'en région Franche-Comté (Brun, 2007). Il existe aussi deux bases dans les pays limitrophes : une pour les Iles Britanniques et une pour l'Europe Centrale. La base de la BSBI[98] sert de nomenclature pour la flore britannique[99]. Dans cette base, le statut des espèces pour les Iles Britanniques est précisé. Ces données de statuts proviennent des travaux de C.D. Preston (Preston *et al.*, 2004). Il existe aussi une base pour l'Europe Centrale (Lohmeyer & Sukopp, 1992, 2001[100]).

La Manche est un frein à la diffusion des espèces entre l'Ouest de la France et les Iles Britanniques. Toutefois, malgré sa présence, les flores de ces deux régions sont très proches. Toutes deux se situent dans le domaine atlantique. Les flores de Franche-Comté et d'Europe

[98] Botanical Society of the British Isles.

[99] Disponible sur http://www.bsbi.org.uk/LIST2007.txt.

[100] Ouvrages non consultés, listing d'espèces disponibles sur internet : http://www2.tu-berlin.de/~oekosys/pdf_dateien/liste_agrio.pdf.

Centrale sont nettement plus différentes de la flore de l'Ouest de la France malgré l'absence de barrière physique comme la Manche. La barrière climatique entre ces régions est finalement plus forte. Il est donc plus judicieux dans notre cas de nous appuyer sur la base du BSBI[101].

Toutes ces informations sont stockées dans la table « BSBI ».

- **Types biologiques**

Il est aussi utile pour mettre en évidence d'éventuelles stratégies d'adaptation des plantes aux perturbations ou des différences de stades dynamiques sur les structures d'utiliser simplement les types biologiques de Raunkiaer (Cf. 3.2.3.1.2). Les caractéristiques des espèces sont récupérées dans la base Plantatt. Seul le type biologique dominant est récupéré. Cette base utilise la nomenclature de la base BSBI. Ces informations sont consignées dans la table « Plantatt » de la base de données.

- **Modes de dispersion**

Il est utile d'intégrer les modes de dispersion des espèces. Il a été vu que les modes de dispersion pouvaient renseigner sur l'éventuelle introduction d'espèces sur les sites (Cf. 3.2.2). Ils peuvent aussi indirectement donner des informations sur la présence de stades dynamiques différents au niveau des structures à travers les vitesses de dispersion (Cf. 3.3.2). Ces informations sont extraites de la base Ecoflora. Elles sont stockées dans la table « Ecoflora »

- **Stratégies reproductices**

Les stratégies d'adaptation aux perturbations potentiellement observables sur structures peuvent être appréhendées grâce aux modes de multiplication des espèces (Cf. 3.2.3.1.2). Ces modes de multiplication sont consignés dans la base Ecoflora. Ils sont stockés dans la base de données sous la table portant ce nom.

- **Périodes de floraison**

La période de floraison des espèces est le reflet de stratégies. Il existe des phénomènes de compétition pollinique entre différentes espèces (Cf. 3.2.3.2.5). Cette compétition interspécifique peut expliquer les différences de flores sur structures. Les données utilisées concernant la période de floraison des espèces sont issues de la base Ecoflora. Elles aussi sont stockées dans la table « Ecoflora ».

- **Capacité de résistance aux métaux lourds**

Enfin la flore sur structures peut être liée à des modifications chimiques du sol (Cf. 3.2.3.2). Cette modification peut être extrême dans le cas des métaux lourds. Peu d'espèces sont capables d'y résister. On parle alors d'espèces pseudométallophytes. Certaines espèces ne poussent que sur ces sols pollués. Ce sont des eumétallophytes. Pour certaines espèces, seule une variété ou une sous-espèce locale sont eumétallophytes. L'espèce est alors

[101] Cette décision a été prise à la suite d'une discussion avec C.D. Preston sur ce sujet.

désignée comme métallophyte locale. Les autres espèces sont des non métallophytes. Ces comportements sont décrits dans la base Ecoflora et stockés dans la table du même nom.

6.2.2 Indices de bioindication utilisés

Les espèces peuvent parfois décrire le milieu. Des valeurs quantitatives leur sont alors attribuées. Ce sont des indices de bioindication.

- **Indices de Grime**

Il est d'abord utile d'intégrer les indices de Grime (Grime, 1977, 1979). Ces indices ont été développés sur les espèces de la flore britannique. Ils apportent des informations sur les stratégies des espèces face aux perturbations du milieu. D'après J.P. Grime, chaque espèce trouve un compromis entre trois stratégies que sont la compétitivité (**C**), la résistance au stress (**S**) et la rudéralité (**R**) (Cf. 3.2.3.1). Entre ces trois extrêmes, des cas intermédiaires ont été développés : **CR**, **SC** et **SR** et **CSR**. De nouveaux intermédiaires ont pu être développés entre chaque couple de ces sept modèles aboutissant ainsi à 19 comportements. Chaque comportement est transformable en pourcentage relatif d'énergie alloué à chacune des trois stratégies (fig. 39).

L'ensemble des données de comportements est stocké dans la table « Grime ». La table « valeurs Grime » stocke pour chaque comportement les pourcentages relatifs équivalents d'énergie alloués aux stratégies **C**, **S** et **R**.

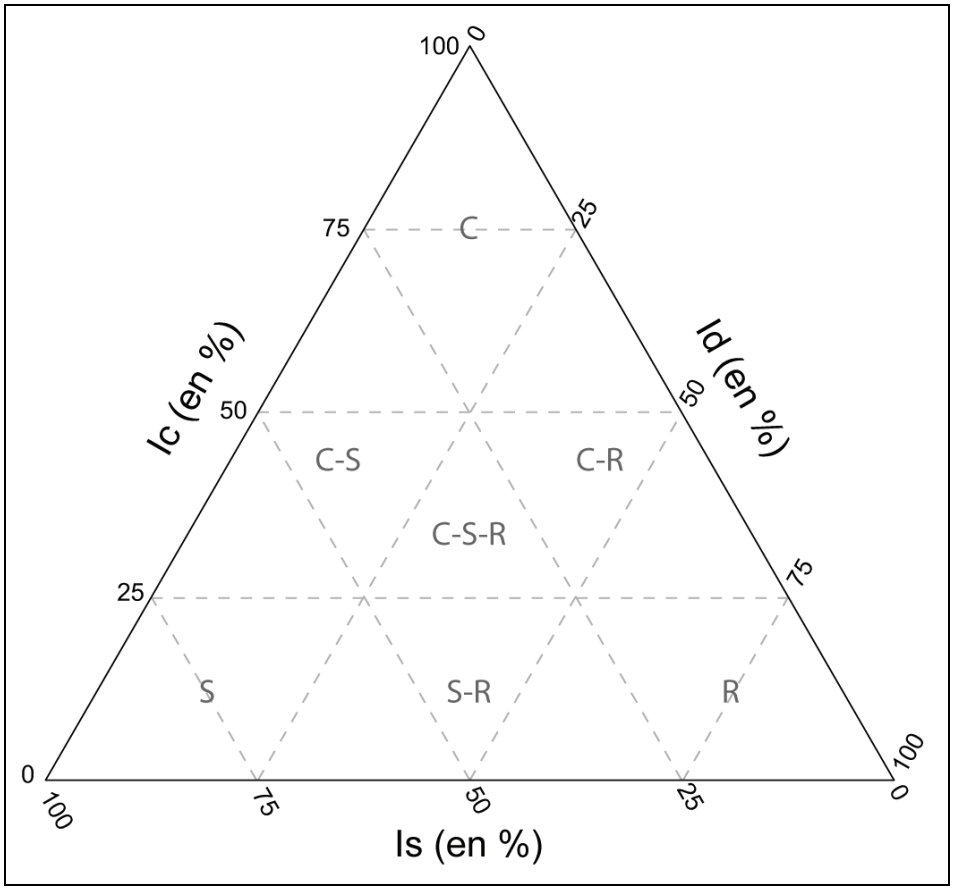


Figure 39 - Types fonctionnels de Grime (d'après Grime, 1977) : le modèle CSR (Où Ic est l'importance relative de la compétition ; Id l'importance relative de la perturbation ; Is l'importance relative du stress)

- **Indices d'Ellenberg**

Il est aussi nécessaire pour caractériser le milieu d'utiliser les indices d'Ellenberg (Ellenberg *et al.*, 1992) (Cf. 3.2.3.2.4). Les indices utilisés pour l'étude sont ceux qui abordent la réponse des espèces aux propriétés physico-chimiques des sols ainsi qu'à l'ouverture du milieu. L'étude se bornant à des sites restreints, l'indice de continentalité n'a pas été jugé pertinent. La réponse des espèces à la richesse du sol est abordée via un indice de nitrophilie **N**. Cet indice est établi sur une échelle allant de 1 à 9. Les espèces de milieux riches ont les valeurs les plus élevées. Les comportements des espèces vis-à-vis du pH du sol sont notés par l'indice de basicité **R**. Cet indice est aussi établi sur une échelle de 1 à 9. Les espèces ayant les valeurs les plus basses sont les espèces poussant sur les sols les plus acides. L'indice d'humidité **F** consigne les notes données aux espèces vis à vis de leur comportement quant à l'humidité du sol. Ces notes s'étagent de 1 à 12. Les notes les plus basses sont attribuées aux espèces des milieux les plus secs. Le degré de tolérance au sel des espèces est abordé par l'indice de salinité **S**. Il est échelonné sur une échelle de 0 à 9. Les plus fortes valeurs sont attribuées aux espèces des milieux hyper-salés. L'indice de luminosité **L** rapporte les comportements des espèces relativement à l'ouverture du milieu. Ces notes s'étalent de 1 à 9. Les espèces d'ombre ont les valeurs les plus basses. Certaines espèces n'ont pas de comportement particulier pour un de ces facteurs. Ce sont des espèces ubiquistes. Elles sont alors caractérisées par une absence de note.

Ces indices ont été développés à la base sur les espèces d'Europe Centrale. Les indices utilisés ici sont ceux modifiés et élargis à l'ensemble de la flore britannique (Hill *et al.*, 2004)[102]. Ce choix a été réalisé afin d'intégrer les espèces océaniques absentes de la première étude. La flore britannique est plus proche de la flore française que celles des pays d'Europe Centrale du point de vue des espèces. L'étude de M.O. Hill a aussi été choisie afin de limiter le problème des écotypes[103]. Les divergences génétiques sont liées à l'éloignement géographique. La génétique dicte en partie le comportement physiologique des plantes. L'autécologie des espèces varie donc géographiquement pour cette raison. La proximité géographique entre France et Grande-Bretagne se traduit par une probabilité plus forte d'une proximité génétique. Les comportements autécologiques des espèces ont donc plus de chance d'être proches, d'où le choix des indices modifiés de Hill.

Ces données de comportements sont stockées dans la table « Plantatt ».

- **Indices de Gégout**

Il faut aussi faire appel aux indices développés par J-C. Gégout (Gégout, 2006) (Cf. 3.2.3.2.4). Ceux-ci ne sont en réalité pas des indices mais des optimums. Les valeurs sont issues de modélisations de présence des espèces vis-à-vis de variables du milieu mesurées directement. Les variables édaphiques[104] pour lesquelles le comportement des espèces est étudié sont l'acidité (**pH**), le taux de saturation en bases (**S/T**) et le rapport carbone-azote

[102] Disponible sur : http://www.brc.ac.uk/downloads/PLANTATT_5_Dec_06.zip.

[103] Se dit de variantes locales d'une espèce végétale d'un point de vue autécologique.

[104] Variables liées au sol.

(**C/N**) des horizons de sol A. Les variables climatiques utilisées sont la température minimale de janvier (**Tmin01**), l'évapotranspiration de mars à mai (**ETP0305**), le bilan hydrique de juillet (**BH07**), la température moyenne annuelle (**TmoyA**) et l'altitude (**Altitude**). Les amplitudes de réponse de présence des espèces autour de ces optima sont données. Ces amplitudes varient de 0 à 1 et sont exprimées en 1/10. Une espèce exploitant l'ensemble de la gamme des valeurs mesurées mais avec une préférence autour de son optimum a une amplitude de 1. En revanche, une espèce très spécialisée, ne poussant que pour une valeur précise mesurée, a une amplitude de 0. Ces amplitudes représentent la portion de gradient écologique occupé. Les limites de ces gradients sont celles des mesures effectuées dans l'étude de J.-C. Gégout.

Ces variables peuvent se révéler utiles. La température minimale de janvier, la température moyenne annuelle et l'altitude ne sont pas intégrées car ce sont des variables qui varient peu localement et donc stables aux échelles d'étude. Les données sont stockées dans la table « HDR_GEGOUT».

- **Indices de Hill**

Il est enfin intéressant de prendre en compte les indices d'hémérobie de Hill (Hill *et al.*, 2002) (Cf. 3.2.3.1.2). Trois indices ont été développés. Le premier indice est un indice d'annualité (**annuality**). Pour chaque espèce, il renseigne sur la proportion moyenne d'espèces annuelles associées. Le deuxième indice est l'indice d'urbanité (**1km urbanity**). Il donne à chaque espèce la proportion moyenne d'espace urbain associée sur l'ensemble de la Grande-Bretagne. L'indice de néophytie est le troisième développé par cet auteur (**proportion neophyte**). Il donne pour chaque espèce la proportion moyenne d'espèces néophytes associées. Ces trois indices sont très corrélés. Ils permettent tous les trois d'évaluer l'anthropisation du milieu. Ces indices peuvent donc éventuellement permettre de déceler la trace des activités humaines sur la flore.

Toutes ces données sont compilées dans la table « HILL ».

6.2.3 Liaisons entre tables

Toutes ces données récupérées utilisent des nomenclatures différentes. Il est nécessaire d'harmoniser les données avec la nomenclature INPN. Il n'a pas été trouvé de table toute faite donnant les équivalences entre les différentes nomenclatures. Cette harmonisation ne peut être réalisée à la main du fait du grand nombre d'espèces dans chaque base. Il est nécessaire de procéder par requêtes. Lorsque, pour une base, les espèces sont décrites par un nom de genre, un nom d'espèces et un nom d'auteur, il a été facile de faire le lien entre la table concernée et la table « INPN » (contenant un bon nombre de synonymes). Les codes espèces de la base INPN ont ainsi pu être attribués. Cela n'a pu être effectué que pour la table « BSBI ». Les tables « Plantatt », « Grime » et « Hill » sont basées sur la nomenclature de Stace comme la base BSBI. Il a donc été possible pour ces tables de récupérer les codes espèces de la table « INPN » à partir de la table « BSBI ». Pour la base de Gégout, la nomenclature est la même que celle de la base INPN. Il n'y a donc pas de problèmes de liaison entre tables même si les noms d'auteurs ne sont pas précisés. Une fois toutes ces tables connectées (fig. 40), il est

enfin possible d'effectuer des requêtes pour aborder l'écologie des relevés.

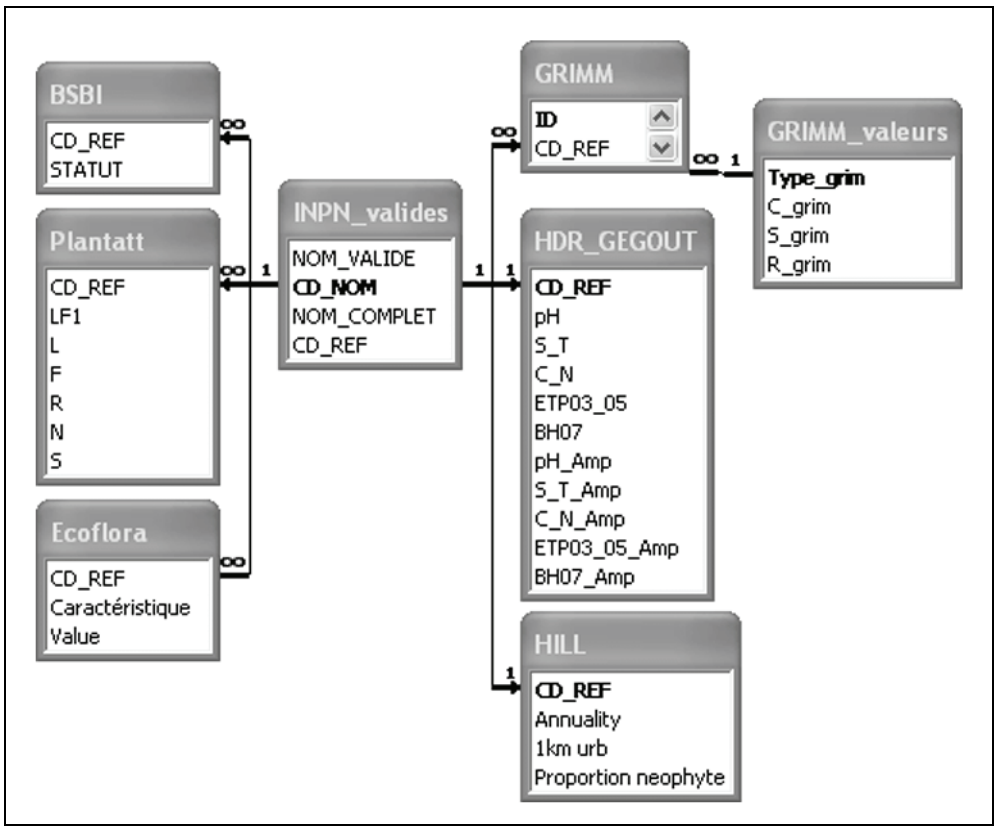


Figure 40 - Structure des données d'écologie intégrées dans la base de données VEG

6.2.4 Calcul des indices synthétiques de bioindication

6.2.4.1 Indices de caractérisation de la flore (descriptions)

Pour chaque relevé, il est intéressant de connaître la proportion d'espèces répondant à une caractéristique écologique particulière. Le calcul de cette proportion est réalisé à l'aide d'une requête. Le calcul utilisé est le suivant :

$$Pi = \frac{xi}{ni} * 100$$

Où x est le nombre d'espèces présentant la caractéristique écologique i et ni le nombre d'espèces renseignées sur cette caractéristique.

Tous ces pourcentages sont stockés dans la table « descriptions ».

6.2.4.2 Indices de caractérisation du milieu (prédictions)

Pour chaque relevé, il est possible de calculer des indices synthétiques intégrant le comportement écologique des espèces présentes. Ce calcul est réalisé à l'aide d'une requête dans la base de donnée.

Pour les indices d'Ellenberg, de Grime et de Hill, il est intéressant de prendre en compte l'abondance/dominance des espèces. Plus une espèce est abondante, plus elle a de chance d'être dans son milieu de prédilection. L'indice d'une espèce très recouvrante doit donc avoir

un poids plus fort dans le calcul de l'indice moyen que l'indice d'une espèce peu recouvrante. Les indices moyens doivent donc être pondérés dans le calcul par l'abondance/dominance des espèces présentes. Cette abondance/dominance n'est pas numérique. Pour cela, il est nécessaire de convertir l'abondance/dominance des espèces en échelle numérique suivant les préconisations de E. Van der Maarel (Van der Maarel, 1979). La table « Indice A/D » contient ces valeurs équivalentes d'indices de Van der Maarel.

La formule utilisée dans la requête pour le calcul des indices moyen est :

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} xi.yi}{\sum_{i=1}^{n} yi}$$

Où x*i* est l'indice de l'espèce *i* et y*i* la valeur d'abondance/dominance de l'espèce *i* exprimé d'après l'échelle préconisée par E. Van der Maarel.

Pour les indices de Gégout, il est préférable de prendre en compte l'amplitude des espèces en plus de l'optimum. Plus une espèce d'un relevé a une amplitude réduite, plus il y a de chance que le relevé corresponde au milieu de prédilection de cette espèce. Les indices moyens doivent donc être en plus pondérés dans le calcul par l'amplitude autour des optimums des espèces présentes.

La formule utilisée pour le calcul des indices moyen est alors :

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} xi.yi.(1 - zi)}{\sum_{i=1}^{n} yi.(1 - zi)}$$

Où x*i* est l'optimum de l'espèce *i*, y*i* la valeur d'abondance/dominance de l'espèce *i* exprimé d'après l'échelle préconisée par E. Van der Maarel et z*i* l'amplitude de l'espèce *i* pour le facteur concerné.

Toutes ces indices moyens sont stockés dans la table « prédictions ».

6.3 Etude des sols

6.3.1 Prélèvements

6.3.1.1 Sites échantillonnés

Les sites échantillonnés sont le site du Goënidou, le site de Kervédan et celui de Pont-Calleck.

Le site de La Montagne n'a pas été échantillonné car la variation latérale de faciès topographique du talus actuel peut avoir une forte influence sur les propriétés des sols. Cette variabilité des sols peut être supérieure à celle observée entre points distants le long de ce talus. Un prélèvement de sol de sommet de talus peut avoir des propriétés physico-chimiques plus proches avec un prélèvement réalisé sur le haut du talus à une centaine de mètres qu'avec

un prélèvement réalisé dans le fossé juste à proximité. Or l'étude fait abstraction de ce modelé. Les pieds des ligneux sont considérés sur une ligne alors que certains sont situés sur le haut de talus et d'autres plus au niveau du fossé. Cette variabilité latérale des sols n'est donc pas propice à l'échantillonnage de prélèvements de sols.

6.3.1.2 Plans d'échantillonnage

Lorsque le protocole adopté est celui de relevés de végétation contigus (sites de Goënidou et de Kervédan), chaque relevé fait l'objet d'un prélèvement de sol en son centre sur l'horizon hémi-organique A1. Ses propriétés physico-chimiques ont un impact direct sur la végétation : les plantes y développent leurs racines et y puisent les nutriments. Dans le cadre de l'étude des relations sols-plantes, c'est donc cet horizon qu'il faut prélever en priorité.

En l'absence de fouilles, des fosses sont réalisées au centre de chaque relevé à la bêche (site du Goënidou). Lorsque des fouilles sont programmées, il est aussi efficace de profiter de ces dernières pour réaliser les prélèvements (site de Kervédan). Les prélèvements sont alors effectués une fois la végétation et l'horizon organique enlevés.

Pour l'analyse d'une espèce végétale (site de Pont-Calleck), les prélèvements sont réalisés en fin de sondages. Ces prélèvements sont réalisés au niveau des coupes. Sous le pied fouillé, des prélèvements sont réalisés au niveau de chaque coupe et pour chaque horizon remarqué. En s'éloignant du pied, tous les mètres, des témoins sont réalisés dans les mêmes conditions.

6.3.2 Analyses des prélèvements de sols

6.3.2.1 Choix des analyses

Les analyses possibles sur un échantillon de sol sont très nombreuses. Il est donc nécessaire de bien choisir celles à effectuer. Les analyses réalisées doivent être peu onéreuses au regard du grand nombre de prélèvements. La priorité est donnée au nombre d'analyses afin d'avoir une validité statistique.

Le choix doit surtout se faire en fonction des problématiques. Les analyses doivent donc porter sur les facteurs conditionnant la végétation et susceptibles d'être influencés par la présence de structures.

6.3.2.1.1 Propriétés-physico-chimiques des sols susceptibles d'être modifiées par les occupations anciennes

Il est connu depuis longtemps que les activités humaines modifient la physico-chimie des sols. Par exemple, les activités liées à l'élevage créent des pollutions en nitrates et phosphates. Ces minéraux sont naturellement très peu présents dans les sols. Leur présence à de fortes concentrations est liée aux fèces. Les nitrates sont souvent lessivés assez rapidement, d'où leur forte concentration dans les eaux de surface. Les phosphates sont fixés plus fortement au sol et ne sont donc pas lessivés avec le temps. Cette caractéristique en fait un très bon marqueur d'occupations humaines anciennes. Ainsi, dès le début du XX° siècle, Arrhenius a mis en évidence que les concentrations en phosphates était supérieures au niveau de sites

d'occupation humaine ancienne (Arrhenius, 1929[105]). Les fortes concentrations en phosphates sont liées à l'accumulation ancienne de matières organiques, d'urine ou d'excréments (Cook & Heizer, 1965[106]). La concentration en phosphates est donc liée à la teneur en matière organique d'un sol (Crowther, 1997). L'analyse de la répartition spatiale des phosphates au sein du sol archéologique d'un habitat montre l'intensité de l'occupation de ce dernier ou son degré de conservation (Conway, 1983). Afin de pouvoir effectuer des cartographies de phosphates sur de grandes surfaces de sols archéologiques, des méthodes simples d'analyses ont été développées (Craddock *et al.*, 1985 ; Terry *et al.*, 2000). L'analyse verticale des phosphates peut aussi permettre de déterminer les niveaux d'occupation. L'analyse des phosphates des horizons de surface est une méthode de prospection non destructive et permet de localiser les zones de dépotoirs (Sarris *et al.*, 2004). La cartographie des concentrations en phosphates de sols archéologiques est depuis devenue une pratique courante. Ces méthodes peuvent être effectuées sur les phosphates totaux comme sur les phosphates organiques (Leonardi *et al.*, 1999). Certaines précautions quant à l'interprétation des concentrations doivent être prises du fait de la variabilité naturelle des teneurs (White, 1978). Le phosphore est aussi un des constituants majeurs des os. Lors de leur décalcification, les os libèrent des phosphates. Même lors d'une décalcification totale, les phosphates peuvent ainsi révéler la présence ancienne d'ossements (Solecki, 1951). Le dosage des phosphates est donc très utile en archéologie funéraire pour la confirmation du rôle sépulcral de certaines structures lorsque l'acidité des sols ne permet pas la conservation des ossements.

Le phosphore même s'il est l'élément le plus étudié n'est pas le seul à être lié aux occupations anciennes. Il a été montré que d'autres éléments pouvaient aussi voir leurs concentrations varier au niveau de sépultures (Bethell, 1989 ; Bethell & Smith, 1989). Ces différences se traduisent par une augmentation ou une diminution de la concentration de ces éléments par rapport à la matrice. Les sites d'habitats sont aussi concernés par ces modifications de concentrations (Griffith, 1980, 1981). Ces modifications peuvent perdurer pendant plusieurs millénaires pour des éléments majeurs comme le Calcium, le Magnésium ou le Phosphore (Konrad *et al.*, 1983). Les éléments majeurs sont souvent les seuls analysés. Cependant avec les progrès technologiques, de plus en plus d'études prennent en compte les éléments traces (Entwistle & Abrahams, 1997 ; Entwistle *et al.*, 1998 ; Entwistle *et al.*, 2000a ; Entwistle *et al.*, 2000b ; Linderholm & Lundberg, 1994). Des éléments métalliques et aussi des métaux lourds comme le plomb ou le mercure peuvent montrer des concentrations plus élevées au niveau de sites d'artisanat (Cook *et al.*, 2003 ; Parnell *et al.*, 2002). Les ratios élémentaires peuvent aussi être de bons indicateurs d'occupations humaines anciennes. Une étude sur un bâtiment expérimental au Mexique montre que la présence d'un foyer enrichit considérablement le sol en de nombreux éléments notamment en Potassium (Middleton & Price, 1996). Les cendres riches en minéraux sont responsables de cet apport à l'intérieur des bâtiments. Les murs font écran à la dispersion de ces cendres. Ce fait s'observe aussi sur des habitats archéologiques. Les concentrations élémentaires permettent de délimiter les surfaces

[105] Ouvrage non consulté (cité par Craddock *et al.*, 1985).

[106] Ouvrage non consulté (cité par Sjöberg, 1976).

intérieures et extérieures. D'autres études ethnologiques ont été réalisées sur des camps de pêcheur dans l'Arctique (Knudson *et al.*, 2004). Ces études de chimie élémentaire de sites archéologiques sont actuellement en plein essor. Elles servent à caractériser les surfaces d'activité archéologique (Homsey & Capo, 2006 ; James, 1999 ; Middleton, 2004 ; Wells, 2004 ; Wilson *et al.*, 2008). Ces études s'effectuent même sur des sites archéologiques très récents (Sullivan & Kealhofer, 2004). En tenant compte de tous ces auteurs, il semble que tous les éléments peuvent présenter des différences de concentrations entre sites et hors sites voire au sein d'un site entre différentes structures ou zones d'activités.

Le pH semble aussi être perturbé par les occupations anciennes (Humbert, 2002). Les éléments organiques comme le carbone et l'azote voient aussi leurs concentrations bouleversées (Schlezinger & Howes, 2000). Les usages anciens peuvent toucher toutes les propriétés des sols. Le taux de sable des sols peut aussi être modifié (Humbert, 2002). Ce sable peut être issu de la dégradation des matériaux de construction. Ce facteur entraîne des différences de drainage des sols. Ces différences de drainage sont bien connues des prospecteurs aériens. En période très humide ou très sèche, certaines structures apparaissent. Ces différences d'humidité sont, pour beaucoup d'archéologues, les seuls responsables des structures visibles par avion.

6.3.2.1.2 Propriétés-physico-chimiques des sols susceptibles d'influer sur la végétation

Les propriétés des sols dictant la nature de la végétation sont l'eau et les éléments minéraux. Ces éléments peuvent être essentiels (nutriments) ou toxiques.

L'eau des sols est apportée par les précipitations et par les nappes. Le sol est un matériau poreux. Les pores du sol retiennent l'eau de pluie. La rétention s'opère par effet capillaire. Plus les pores sont petits, plus la force capillaire est grande et peut retenir l'eau et empêcher son infiltration. La quantité d'eau dans un sol est donc fonction de sa granulométrie et de sa structure. Elle est aussi fonction des précipitations. La teneur en eau d'un sol varie donc au cours du temps. Cette eau est nécessaire aux plantes. Elle est le constituant majoritaire des cellules vivantes. Le faible diamètre des vaisseaux permet à l'eau de monter facilement dans la plante à l'aide de la force capillaire. La transpiration au niveau des feuilles crée une aspiration au niveau de ces vaisseaux. Ce phénomène se répercute dans toute la plante jusqu'aux racines.

L'eau en pénétrant dans la plante entraîne avec elle des minéraux. Ces minéraux peuvent être essentiels aux plantes (nutriments) ou toxiques. Ils sont assimilés par les végétaux sous leur forme soluble, c'est à dire sous la forme d'ions. Ces ions peuvent être chargés positivement (cations) ou négativement (anions).

Les cations sont retenus dans les sols par des liaisons avec des molécules du sol chargées négativement. Ces molécules sont des composés humiques et des argiles. L'ensemble de ces composés retenant les cations est appelé complexe absorbant ou complexe argilo-humique. En fonction de sa teneur en matière organique ou en argile, un sol est donc plus ou moins apte à retenir les cations. Cette aptitude est appelée capacité d'échange cationique (T ou CEC). Les

cations retenus peuvent être basiques (Ca^{2+}, K^{+}, Mg^{2+}, Na^{+}) ou acides (Al^{3+}, H^{+}). Les cations basiques (S) sont généralement utiles aux plantes et les acides néfastes. La part du complexe d'échange occupé par ces cations basiques (S/T) reflète la fertilité d'un sol. Cette proportion est appelée taux de saturation. Le calcium (Ca) est un constituant essentiel des parois cellulaires. Le Potassium (K) régule de nombreuses fonctions cellulaires (divisions cellulaires, synthèse des protéines et des glucides, turgescence et pH cellulaire, activité enzymatique…). Le magnésium (Mg) est un constituant de la chlorophylle et un cofacteur de certaines réactions enzymatiques. Le sodium (Na) est toxique à hautes concentrations mais est essentiel pour certaines espèces (végétaux C4) (Hopkins, 1995). A hautes concentrations, l'aluminium (Al) bloque le développement racinaire.

Parallèlement, les anions sont retenus par des molécules chargées positivement appelées alors complexe anionique. Les principaux anions concernés sont les phosphates, les nitrates et les sulfates. La concentration de ces différents ions dans le sol a une nette influence sur la végétation. Les plantes ont développé des mécanismes passifs ou actifs pour récupérer ces éléments au niveau des complexes cationique et anionique.

6.3.2.1.3 Analyses choisies

Concernant les facteurs hydriques, le plus simple est de mesurer le taux d'humidité du sol et d'estimer le drainage par la mesure du taux d'éléments grossiers (>2mm). Ceci est facilement réalisable au laboratoire à l'aide d'une étuve et d'un tamis.

Pour les nutriments, il est préférable de s'intéresser aux éléments mobilisables par la végétation et non aux éléments totaux du sol. Seuls les éléments sous forme ionique ont un effet direct sur la végétation. Les éléments contenus dans les minéraux n'ont pas d'influence directe. Seule l'altération des minéraux peut conduire ces éléments à une forme ionique mobilisable. Les nutriments à analyser en priorité sont les macroéléments. Ces macroéléments, constituant majoritaires des plantes sont ceux qui influencent le plus la végétation. La disponibilité des éléments est fonction du pH du sol. L'étude portant sur la végétation observée et non sur la végétation potentielle, il est donc nécessaire de mesurer la disponibilité des éléments au pH du sol. Pour les cations, les éléments retenus pour l'analyse sont les macroéléments Ca, K, Mg et Na et l'oligoélément Fe. Tous ces éléments sont en effet extractibles par la même méthode du cobaltihexamine et leurs concentrations mesurables au laboratoire. Ces valeurs n'ont d'utilité que comparées à la capacité d'échange cationique au pH du sol (CECe ou capacité d'échange cationique effective). Cette CECe est mesurable à partir de la même solution d'extraction. Concernant les anions, seule la concentration en Phosphore disponible au pH du sol est mesurée (méthode Dyer). Les nitrates étant lessivés rapidement, ils n'ont pas été mesurés.

Pour les éléments toxiques, il faut surtout envisager la toxicité par acidité due aux ions Al^{3+} et H^{+}. La concentration en Al^{3+} est mesurable par la méthode du cobaltihexamine. Concernant la toxicité par H^{+}, la mesure la plus simple est la mesure du pH (pH_{eau}) et du pH potentiel (pH_{KCl}) réalisable au laboratoire. Les toxicités par pollutions aux métaux lourds ne sont pas

envisageables sur les sites étudiés (pas de sites métallurgiques).

Il est aussi utile de mesurer le rapport carbone/azote. Celui-ci est en effet considéré comme étant un bon indicateur de la dynamique de la matière organique et ayant une forte influence sur la végétation.

Toutes ces analyses sont réalisées suivant les normes de l'Association Française de Normalisation (AFNOR, 1999).

6.3.2.2 Préparation des échantillons (norme ISO 11464)

Les échantillons sont tout d'abord pesés dès le retour de terrain. Ils sont ensuite mis à sécher à l'étuve à 40°C. Les échantillons restent à l'étuve jusqu'à arrêt de perte de masse. La masse sèche est notée.

Les sols secs sont ensuite tamisés. La taille de maille de 2mm utilisée est celle préconisée par la norme. Lors du tamisage, les agrégats sont dissociés manuellement. La terre fine et les résidus de tamis sont alors pesés. Ces pesées permettent d'évaluer le taux de pierrosité (taux de >2mm). Associées aux pesées du séchage, il est alors possible d'estimer le taux d'humidité initial de la fraction fine (<2mm).

Lors du tamisage, des artéfacts ont pu être observés. Il a été décidé de les isoler en triant les résidus de tamis sous loupe binoculaire. Ce tri a été réalisé par F. Lanoë, stagiaire à l'UMR CReAAH en parallèle de sa première année d'histoire de l'art et archéologie à l'université de Rennes2 (codirection : D. Marguerie). Les différents types d'artéfacts sont ensuite pesés. Concernant les graines carbonisées récoltées, les déterminations ont été confiées à M. Cabanis (INRAP Auvergne).

Certaines prises d'essai se faisant sur des masses infimes, il est nécessaire de broyer un aliquote des échantillons (toute prise d'essai de moins de deux grammes doit se faire sur sol broyé conformément à la présente norme). Environ 50 cm^3 de sol par échantillon sont pour cela broyés au broyeur planétaire (appareil disponible à l'UMR SAS).

6.3.2.3 pH (norme ISO 10390)

Chaque échantillon a ensuite fait l'objet de mesure de pH. Ces mesures ont été réalisées par L.-A. Jouanno, stagiaire à l'UMR CReAAH en parallèle de sa première année de Chimie à l'université de Rennes1 (codirection : D. Marguerie).

La prise d'essai de sol s'effectue à l'aide d'une cuillère calibrée de 2 cm^3. Cet aliquote est mis en suspension dans un flacon avec 10 ml d'eau déminéralisée mesuré à l'aide d'éprouvette graduée (conductivité inférieure à 0.1 $\Omega.cm^{-1}$). Ce rapport volumétrique de 1 à 5 suit les recommandations présentées dans la norme. La solution de sol est ensuite mise en agitation. Afin d'atteindre l'état équilibre, la mesure des pH se fait de la $1^{ère}$ à la $24^{ème}$ heure (précision de mesure : 0.1 unités de pH). Cette mesure permet d'obtenir l'acidité réelle ou pH_{eau}.

Il a aussi été décidé de mesurer l'acidité potentielle des sols ou pH_{KCL}. Ces mesures se déroulent de la même manière que pour les pH_{eau}. La seule différence est l'utilisation de KCl 1N en remplacement de l'eau déminéralisée.

6.3.2.4 C/N (normes ISO 10694 et ISO 13878)

- ***Pesée***

Les pesées ont été réalisées au sein du pôle analytique de l'UMR SAS.

Les prises d'essais sont effectuées sur échantillons de sols broyés. Elles sont pesées dans des nacelles en étain sur une balance de précision 10^{-5}g. Ces nacelles sont scellées après avoir chassé l'air ambiant. Pour les échantillons semblant les moins organiques, la masse prélevée va jusqu'à 30mg environ. Pour les échantillons de couleur plus foncée, la masse prélevée descend jusqu'à 10mg. Parallèlement, environ 1 gramme d'échantillon broyé est séché à l'étuve à 105°C pendant 4 heures. Le taux d'humidité résiduelle peut ainsi être mesuré. Associé au taux d'humidité obtenu à 40°C, il permet d'obtenir le taux d'humidité initial de la fraction fine.

- ***Mesure***

Les mesures ont été effectuées par B. Blaize du pôle analytique de l'UMR SAS.

L'ensemble des nacelles réalisées lors de la pesée sont brûlées dans un analyseur élémentaire. Après oxydation de l'azote et du carbone de la matière organique, les gaz émis sont réduits dans l'appareil en N_2 et CO_2. Ces derniers sont ensuite séparés dans une colonne avant de passer devant un capteur permettant de mesurer leurs volumes respectifs. La comparaison avec des échantillons de sols étalons passés dans les mêmes conditions permet de ramener ces volumes en concentrations initiales en C et N (en pourcentages de sol sec).

6.3.2.5 Phosphore assimilable au pH du sol : méthode Dyer (norme NF X31-160)

L'ensemble des mesures a été réalisé en collaboration avec A. Racapé (pôle analytique de l'UMR SAS) et F. Lanoë (stagiaire Licence 1 ALC, Univ. Rennes2).

- ***Principe***

Le phosphore soluble du sol est extrait par une solution d'acide citrique. Ce phosphore est mis à réagir avec un réactif sulfomolybdique créant un complexe phosphomolybdique. Ce complexe est réduit à chaud par l'acide ascorbique en milieu sulfurique. Il prend alors une couleur bleue. Le dosage est effectué par spectrométrie d'absorption moléculaire à 825nm.

- ***Extraction***

Des prises d'essai de 10g (à 10 mg près) sont réalisées sur la fraction fine. Chaque aliquote est mis en suspension dans 50 ml d'acide citrique (à 20 $g.l^{-1} \pm 0.01$ $g.l^{-1}$) puis mis à agiter à 40 $tours.min^{-1}$ pendant 16 heures. La température ambiante doit être de 20°C ± 1°C. L'arrêt de la réaction d'extraction se réalise par centrifugation à 4300 $tours.min^{-1}$ pendant 10 minutes. Quelques millilitres de la partie limpide du surnageant sont alors pipetés dans un tube à essai. Les tubes sont conservés au réfrigérateur jusqu'à fin des analyses en cas de nécessité de reprise de mesures aberrantes.

- ***Réalisation des solutions étalons***

En plus d'un blanc, trois solutions étalons sont réalisées. Les concentrations finales en orthophosphates sont de 0, 9, 22.5 et 45 $mg.l^{-1}$ et de $20g.l^{-1}$ d'acide citrique (pour être dans des conditions équivalentes aux solutions d'extractions).

Un litre de solution mère d'orthophosphate à $450mg.l^{-1}$ de phosphore est préparée par dissolution de 1.976g ± 0.001g de dihydrogénophosphate de potassium (KH_2PO_4) dans de l'eau ultra-pure. Le dihydrogénophosphate est à l'avance séché à l'étuve à 105°C pendant 2 heures puis passé au dessiccateur.

Pour chaque étalon, 2g d'acide citrique sont pesés dans une fiole jaugée de 100 ml. 2, 5 et 10 ml de solution mère d'orthophosphate sont respectivement ajoutés. Le volume de chaque solution est ensuite ajusté à 100 ml par ajout d'eau ultra-pure. Le blanc est réalisé de la même manière mais sans ajout de solution mère d'orthophosphate.

- ***Préparation du réactif de coloration***

Une solution mère d'acide sulfurique à 5 $mol.l^{-1}$ est tout d'abord préparée. Dans une fiole d'un litre, 278ml d'acide sulfurique de densité 1.84 sont versés lentement dans 500ml d'eau ultra-pure. Une fois refroidi, de l'eau ultra pure est ajoutée pour ajuster au litre. Cette solution mère stable est préparée à l'avance.

Une solution mère de réactif sulfomolybdique est ensuite préparée à $40g.l^{-1}$ de MoO_3 et 5 $mol.l^{-1}$ de H_2SO_4. Dans une fiole d'un litre, 278ml d'acide sulfurique de densité 1.84 sont versés lentement dans 400ml d'eau ultra-pure. Une fois refroidi, 49.08g± 0.01g d'heptamolybdate d'ammonium tetrahydraté [$(NH_4)6Mo_7O_{24}$, $4H_2O$] y sont ajoutés et dissous. Le volume est ajusté à l'eau ultra-pure. Ce réactif, stable plusieurs années à l'abri de la lumière, est préparé à l'avance.

Le réactif de coloration est enfin préparé. 1g± 0.01g d'acide ascorbique ($C_6H_8O_6$) ainsi que 50mg de thiosulfate de sodium ($Na_2S_2O_3$, $5H_2O$) sont dissous dans 922ml d'eau ultra-pure. Le thiosulfate de sodium est utilisé pour réduire les interférences dues à d'éventuels arséniates (As^{5+}) dans les solutions d'extraction (réduits alors en arsénites As^{3+}). 0.5ml± 0.05ml de formol sont ajoutés pour empêcher la formation d'un trouble dû au thiosulfate de sodium. 53ml± 0.5ml de solution mère d'acide sulfurique puis 15ml± 0.1ml de réactif sulfomolybdique sont enfin ajoutés.

Ce réactif est préparé en dernière minute. Il doit être utilisé dans l'heure suivant sa préparation.

- ***Réaction colorimétrique***

La réaction colorimétrique est réalisée par ajout de 0.1ml de filtrat (ou de solution étalon) dans un tube à essai. Dès que le réactif de coloration est prêt, 9.9 ml de réactif sont ajoutés dans chaque tube. Les tubes sont aussitôt agités puis mis au bain-marie à 100°C pendant 5 minutes. La réaction est arrêtée par refroidissement des tubes dans de l'eau glacée. Une coloration bleue plus ou moins intense apparaît.

- ***Mesure***

Les mesures d'absorption sont effectuées sur un spectromètre à cuve. La longueur d'onde mesurée est de 825nm.

Le zéro de l'appareil est réalisé par lecture d'absorption sur une cuve d'eau déminéralisée. La gamme d'étalons est alors mesurée. Les absorbances lues comparées aux concentrations connues en phosphore des étalons permettent de réaliser une droite d'étalonnage. Il est nécessaire d'avoir une bonne corrélation entre cette droite et les points de mesures. En cas de point de mesure aberrant, celui-ci est éliminé du calcul d'ajustement de la courbe. La droite d'étalonnage est enfin validée.

Les échantillons sont alors mesurés un à un dans l'appareil. Celui-ci renvoie directement les absorbances. Les concentrations équivalentes sont directement calculées à partir de la droite de calibration.

En cas de mesures hors gamme, des aliquotes des solutions d'extractions concernées sont dilués dans de l'acide citrique. Ces nouvelles solutions sont alors mises à réagir avec le réactif de coloration.

6.3.2.6 Capacité d'échange cationique (CEC) et Cations majeurs assimilables au pH du sol : méthode au chlorure de cobaltihexamine (norme NF X31-130)

Les extractions de sol ont été effectuées avec la coopération d'A. Azema, stagiaire à l'UMR CReAAH dans le cadre d'un stage de fin de première année de l'Ecole de Chimie de Rennes (codirection : J.-C. Le Bannier). Sur ces extractions, A. Azema a réalisé les mesures ICP sur les cations majeurs à l'UMR CReAAH et F. Lanoë, les mesures de CEC à l'UMR SAS.

6.3.2.6.1 Extraction

- **Principe**

L'extraction des cations est une réaction d'échange entre les cations du sol et un cation extérieur en excès. Ce cation ne doit pas être un des cations à doser. Le rapport de concentration entre les cations du sol et ce cation extractant doit être comparable d'une analyse à l'autre afin de rester dans des conditions expérimentales équivalentes (rapports préconisés ici entre 1 à 3 et 1 à 10). En effet, une sous-représentation du cation extractant se traduira par une moins bonne extraction des cations et *vis versa*. Les prises d'essai sont donc dépendantes des résultats de la capacité cationique du sol réalisés sur ces extractions. Le cation choisi ici est l'ion complexe cobaltihexamine ($Co(NH_3)_6^{3+}$).

- **Méthode**

Une solution mère de chlorure de cobaltihexamine à 4.458 $g.l^{-1}$ (1/60 N) est préparée. Il faut pour cela dissoudre au milligramme près 4.458 g. de chlorure de cobaltihexamine ($Co(NH_3)_6Cl_3$) dans 700 ml. d'eau distillée dans une fiole jaugée de 1l avant de l'ajuster au volume et de l'homogénéiser.

Un aliquote de l'échantillon de terre est pesé à 0.1 % près pour essai dans un récipient

d'agitation de 100ml. Suite à des essais, il a été décidé de réaliser une prise d'essai de 2.5g. modulable à 1.25g pour les échantillons les plus organiques et à 5g pour les plus minéraux.

La réaction d'échange est déclenchée par l'ajout de 50 ml. de solution mère de chlorure de cobaltihexamine dans le récipient d'agitation. Celui-ci est placé à l'agitateur rotatif à 15 $tr.min^{-1}$ afin de favoriser l'échange. A chaque série d'échantillons, une solution à blanc est réalisée dans les mêmes conditions. La réaction est arrêtée au bout d'une heure par filtration. Des filtres sans cendres sont utilisés afin d'éviter tout apport extérieur de cations. Le filtrat clair est recueilli dans un flacon propre et sec.

Le dosage de la CEC et des cations doit être réalisé au plus tard dans les 24 heures après l'extraction. En effet, la solution est très nutritive et des germes de moisissures risquent de se développer au bout de quelques jours.

6.3.2.6.2 CEC

- **Principe**

En présence de soude et par chauffage, l'ion complexe cobaltihexamine(III) est décomplexé et libère l'ammoniac.

$$Co(NH_3)_6^{3+} \Rightarrow Co^{3+} + 6\,NH_3$$

L'ammoniac formé est chassé par chauffage. Il est ensuite condensé pour être recueilli dans de l'acide borique. Cet acide permet de capter NH_3 après distillation.

$$H_3BO_3 + NH_3 \Leftrightarrow H_2BO_3^- + NH_4^+$$

La concentration de NH_3 en solution est ensuite dosée par un acide fort.

$$NH_3 + H_+ \Rightarrow NH_4^+$$

Les blancs sont dosés dans les mêmes conditions. La comparaison de ces deux dosages permet de mesurer la concentration en ion complexe cobaltihexamine(III) retenus par les sols lors de la réaction d'échange. Il s'agit donc d'un dosage en retour (rétrodosage).

La mesure de cette rétention nous renseigne sur la capacité d'échange cationique des sols. La CEC est exprimée en centimoles par kilogramme de sol. Elle est calculée par la formule suivante :

$$T = \frac{(V1 - V0) \times 2 \times C \times 50 \times 100}{v \times m}$$

où :

V1 = volume de la solution d'acide sulfurique utilisé pour l'essai à blanc, exprimé en ml.

V0 = volume de la solution d'acide sulfurique utilisé pour l'essai, exprimé en ml.

C = concentration de la solution d'acide sulfurique exprimée en $mol.l^{-1}$

v = volume d'extrait et d'essai à blanc exprimé en ml.

m = masse de la prise d'essai exprimée en g.

- **Méthode**

Ces analyses ont été effectuées au pôle analytique de l'UMR SAS avec l'aide de F. Lanoë et A. Racapé. Le protocole de rétrodosage est celui de la norme NF X31-130.

Sur l'extrait de sol, 10 ml sont prélevés et introduits dans un matra de distillation. Quelques gouttes de phénolphtaléine et 25 ml d'eau sont ajoutées. Le matra est alors placé dans l'appareil de distillation. Un bécher est utilisé pour récupérer le distillat. Quelques gouttes de réactif de Tashiro et 40 ml d'acide borique à 40 $g.l^{-1}$ y sont versés.

L'appareil de distillation est alors mis en fonctionnement. L'appareil injecte tout d'abord environ 10 ml de soude à 30% dans le matra. La phénolphtaléine vire alors au rose en passant de sa forme acide à sa forme basique et indique la bonne injection de la soude par l'appareil. Un tuyau permet d'insuffler dans la solution la vapeur d'eau émise par l'appareil. Le bouillonnement est réglé sur une durée de 5 minutes. Le bêcher récupère alors cette vapeur d'eau ainsi que l'ammoniaque. Le passage de l'ammoniaque dans la solution est indiqué par le virement du violet au vert du réactif de Tashiro.

L'ammoniac est ensuite dosé par de l'acide sulfurique à 0,025 $mol.l^{-1}$. Le bécher est directement placé sous une burette automatique à 0.01ml de précision. Le passage du réactif de Tashiro du vert au violet nous donne le repère d'équivalence. Ce virement de couleur se réalise à pH 5.5. « L'équivalence » ne se fait pas à pH neutre, mais elle est à ce pH aussi bien pour le blanc que pour l'échantillon. Les mesures absolues ne nous intéressent pas, seule la différence avec le blanc importe, le pH non neutre d'équivalence n'est donc pas un problème.

6.3.2.6.3 Cations majeurs

- **Principe**

La concentration des cations récupérés par l'extraction est mesurée par ICP-AES (Inductively-Coupled-Plasma-Atomic-Emission-Spectrometry). L'appareil utilisé est un Jobin Yvon 138 ULTRACE. Cet appareil mesure les concentrations élémentaires.

La solution d'extraction est d'abord prélevée par une pompe péristaltique associée à un passeur d'échantillon. Le liquide est dirigé vers une chambre de nébulisation. Il y est brumisé dans un gaz neutre (de l'Argon). Il passe ensuite dans une torche à plasma. Le mélange devient alors gazeux, puis les molécules sont cassées et les atomes excités. Les particules émettent un rayonnement lors de leur retour à un état de moindre excitation. Chaque élément émet un rayonnement spécifique. La concentration en chaque élément peut être mesurée en analysant l'intensité du rayonnement au niveau de leurs longueurs d'ondes caractéristiques. Pour cela, le rayonnement global du plasma est diffracté par un système de réseau (monochromateur). Ce réseau mobile balaye autour des longueurs d'ondes caractéristiques. L'intensité du signal lumineux est alors mesurée par un capteur et analysée par un système informatique. La comparaison des intensités reçues avec celles de solutions de concentrations connues permet de mesurer les concentrations des différents éléments.

- **Méthode**

Il faut tout d'abord réaliser des solutions étalons. Le standard 0 est la solution mère de cobaltihexamine. Un standard « point haut » est réalisé à partir de solutions mères de Al, Fe, Ca, K, Na, Mg diluées dans la solution de cobaltihexamine. La concentration en éléments à analyser de ce standard doit être supérieure à celles de l'ensemble des solutions d'extraction.

Les concentrations élémentaires de ce standard sont donc appelées à être modifiées après quelques analyses tests pour chaque site. Des standards intermédiaires sont aussi réalisés. Il est impératif de réaliser proprement les pipetages ; la fiabilité des analyses dépend fortement des droites de calibration réalisées à partir des standards.

Il est ensuite nécessaire d'étalonner l'appareil. Les longueurs d'ondes sur lesquels l'appareil fait les mesures de chaque élément à analyser sont d'abord choisies. Une série d'étalonnages visant à identifier correctement le signal émis par chaque élément est alors réalisée. Une recherche de pic d'intensité lumineuse pour chaque élément est effectuée par balayage du réseau autour de la longueur d'onde entrée. La longueur d'onde théorique est ainsi adaptée à l'étude au maximum du pic. La tension du générateur de plasma est ensuite adaptée pour une meilleure détection des pics (optimisation de la haute tension). Une fois cette opération effectuée, l'appareil réalise une recherche de profil pour chaque élément. L'amplitude du balayage à effectuer autour de la longueur d'onde idéale est ainsi déterminée.

Une fois l'appareil calibré, il est nécessaire de réaliser des droites d'étalonnage pour chaque élément. Les solutions standards sont alors disposées sur le passeur d'échantillons. Leur emplacement sur le passeur est paramétré dans l'ordinateur de contrôle. Les mesures de calibration sont alors mises en route. Un rinçage avec la solution mère est paramètré entre chaque standard afin d'éviter toute contamination. Pour chaque standard et chaque élément, l'appareil effectue un balayage du réseau et mesure l'intensité lumineuse. Le maximum d'intensité est mesuré par calcul du maximum d'intensité d'une courbe gaussienne passant au mieux par l'ensemble des points de mesures. Trois réplicats sont réalisés à chaque fois. Une intensité lumineuse moyenne est ainsi calculée. Pour chaque élément, il est alors possible de réaliser une droite d'étalonnage d'intensité lumineuse mesurée en fonction des concentrations élémentaires connues des standards. Tout éventuel point aberrant dû à un mauvais pipetage doit être éliminé du calcul de la droite.

Une fois cet étalonnage effectué, il est possible de procéder aux analyses proprement dites. Les solutions d'extraction sont alors disposées sur le passeur. Leur emplacement sur le passeur est paramétré dans l'ordinateur de contrôle de l'appareil. Comme pour l'étalonnage, un rinçage avec la solution mère est paramètré entre chaque échantillon afin d'éviter toute contamination. La méthode de mesure est la même que pour les standards. Trois réplicats sont aussi réalisés pour chaque élément. Une dizaine d'échantillons de sols contrastés de chaque site est alors passée. Ce test permet de refabriquer des solutions d'étalonnage adaptées aux gammes de concentrations des échantillons. Le site de Kervédan étant en milieu aérohalin, les concentrations en sodium de ce site sont nettement supérieures aux autres. Il est donc nécessaire de réaliser une gamme étalon différente pour ce site. Les concentrations définitives des standards sont alors choisies.

L'analyse est lancée. Le passeur d'échantillons permet de disposer une quinzaine d'échantillon en plus de la solution mère et d'un standard de vérification de mesure. L'appareil doit être étalonné tous les jours. Il est donc préférable de réaliser de grandes séries. L'extraction d'une trentaine d'échantillon et leur analyse est facilement réalisable en une journée.

6.3.2.7 Constitution de la base de données sol

Les résultats d'analyses de sols ont été saisis dans la base de données SOL sous MS-Access (fig. 41). La table maîtresse est celle des prélèvements. La base étant commune aux différents sites, un numéro de prélèvement unique est attribué à chaque échantillon (N°auto_prlvt). La table regroupe toutes les informations relatives aux conditions de prélèvement.

Concernant les analyses physiques, les résultats de préparation des échantillons, d'analyse

des charbons, des graines et des artéfacts sont stockés dans quatre tables reliées à la table prélèvement par N°auto_prlvt.

Pour les analyses chimiques, les résultats de pH, de phosphore Dyer, de C/N sont reliés de la même manière à la table prélèvement. Les Résultats d'ICP et de CEC y sont quant à eux reliés par une table intermédiaire extraction.

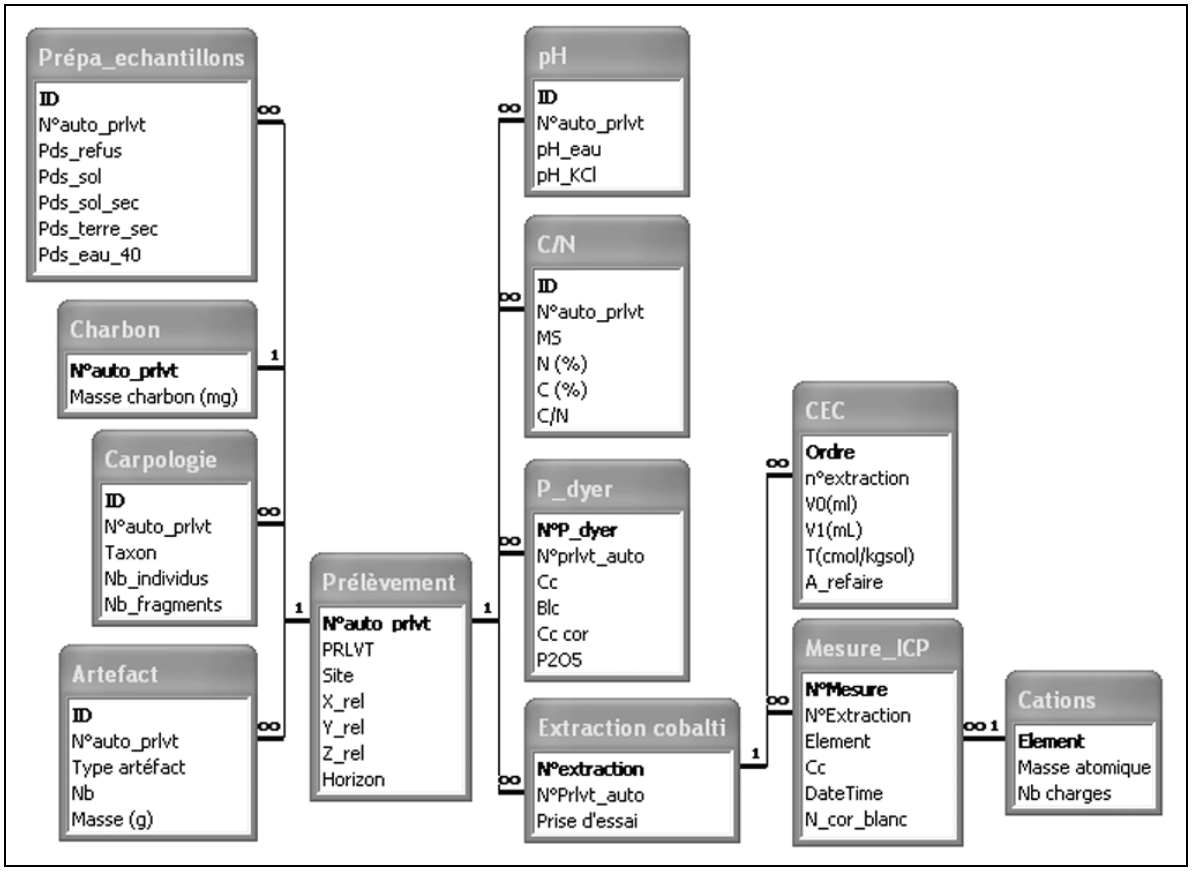


Figure 41 - Structure de la base de données SOL

Pour chaque site, une requête dans la base de données permet de synthétiser, dans une même table, les différentes caractéristiques physico-chimiques des sols. Les propriétés physiques des sols et de drainage sont analysées par les taux de pierrosité et d'humidité ainsi que par les concentrations en charbons et en graines carbonisées. L'acidité est étudiée à travers le pH_{eau}, le pH_{KCl} et la différence des deux (ΔpH). La matière organique est abordée par les concentrations en carbone, en azote, le rapport élémentaire des deux (C/N) et la concentration en phosphore disponible au pH du sol (phosphore Dyer). Le complexe argilo-humique est examiné par sa capacité d'échange cationique (CEC ou T) et par la proportion du complexe occupée par les différents cations (Al/T, Ca/T, Fe/T, K/T, Mg/T, Na/T). La part de cations dits basiques (Ca, K, Mg, Na) au sein de ce complexe est calculée (S/T) ainsi que la proportion de charges du complexe non occupées par les cations dosés et donc potentiellement prise par des protons (H/T).

6.3.2.8 Spatialisation de la base de données sol

Afin de procéder à l'analyse spatiale des données, celles-ci doivent être entrées dans le logiciel ArcGIS.

Une connexion est réalisée entre ArcGIS et la base de données MS-Access. Les tables créées à l'aide de la requête dans la base de données sont ouvertes dans le SIG. Pour Le Goënidou et Kervédan, ces tables sont alors liées aux thèmes de relevés par une jointure sur le numéro de relevé ayant fait l'objet du prélèvement. Il est alors possible de représenter les différentes variables physico-chimiques par des cartes. Pour Pont-Calleck, le numéro de sondage et les coordonnées spatiales xyz permettent de créer facilement des thèmes de points. Pour chaque sondage où ont été réalisés les prélèvements, il est possible de représenter les variations des différentes variables physico-chimiques des sols sur chaque profil coupant les pieds de fragon.

6.4 Etude des sites archéologiques

6.4.1 Site du Goënidou

Sur ce site, il est décidé de réaliser une étude microtopographique.

6.4.1.1 Extraction des anomalies

Chaque angle de relevé de végétation fait l'objet d'une mesure altitudinale. Ces mesures sont réalisées au niveau de chantier. Une mesure est aussi réalisée au niveau d'une borne placée sur le point le plus haut de l'îlot de bâtiments. Une mesure altitudinale absolue de cette borne est par ailleurs effectuée au GPS différentiel. Chaque valeur d'altitude relative peut ainsi être transformée en altitude absolue.

Ces valeurs d'altitude sont ensuite interpolées afin de créer un modèle numérique de terrain (MNT). L'interpolation est réalisée à partir de la version de démonstration de Surfer 8.0. La méthode d'interpolation utilisée est celle de Shepard modifiée.

Le contrôle du rendu se fait par transformation du modèle en modèle de pentes. La pente étant la dérivée de l'altitude, la moindre discontinuité dans le modèle se retrouve aberrante en modèle de pente.

Pour chaque point du MNT, l'altitude moyenne dans un rayon de 10 mètres est calculée. Les micro-variations locales se retrouvent ainsi gommées dans le MNT lissé. Par soustraction du MNT lissé au MNT, il est ainsi possible d'extraire les anomalies microtopographiques. Ce modèle permet de valider les relevés interprétatifs d'anomalies constatées.

6.4.1.2 Interprétation

Par comparaison avec les résultats de fouilles de l'îlot 1, il est possible d'interpréter l'analyse micro-topographique de l'îlot 3. Ce dernier est composé d'un bâtiment isolé à l'ouest et d'un groupe de bâtiments à l'est. Ces deux ensembles sont adossés au nord d'un talus curviligne d'orientation générale est/ouest. Il est bordé dans la partie sud par un fossé. Un autre talus, raccordé au précédent, s'étend vers le nord-ouest entre les bâtiments. Un fossé le longe à l'est. Ce système de talus-fossé semble recouper un système parcellaire plus ancien. Des lambeaux de talus-fossés orthogonaux sont en effet discernables (fig. 42). Ils semblent avoir la même orientation que le parcellaire antique de la parcelle 114. Ces éléments parcellaires délimitent une surface ceinturée par les bâtiments et le talus sud qui serait interprétable comme un jardin (fig. 43). A l'ouest, s'appuyant au nord du bâtiment isolé, un léger replat pourrait avoir cette même fonction. Quant au relief nettement marqué des abords

du groupe de bâtiments les plus à l'est, il semblerait difficile qu'il ne soit dû qu'à la présence des bâtiments. Il apparaîtrait ainsi qu'un talus postérieur l'ait ceinturé. Cette « enceinte » présumée avait une utilité particulière, mais il est impossible de répondre à ce genre de question en l'absence de fouilles.

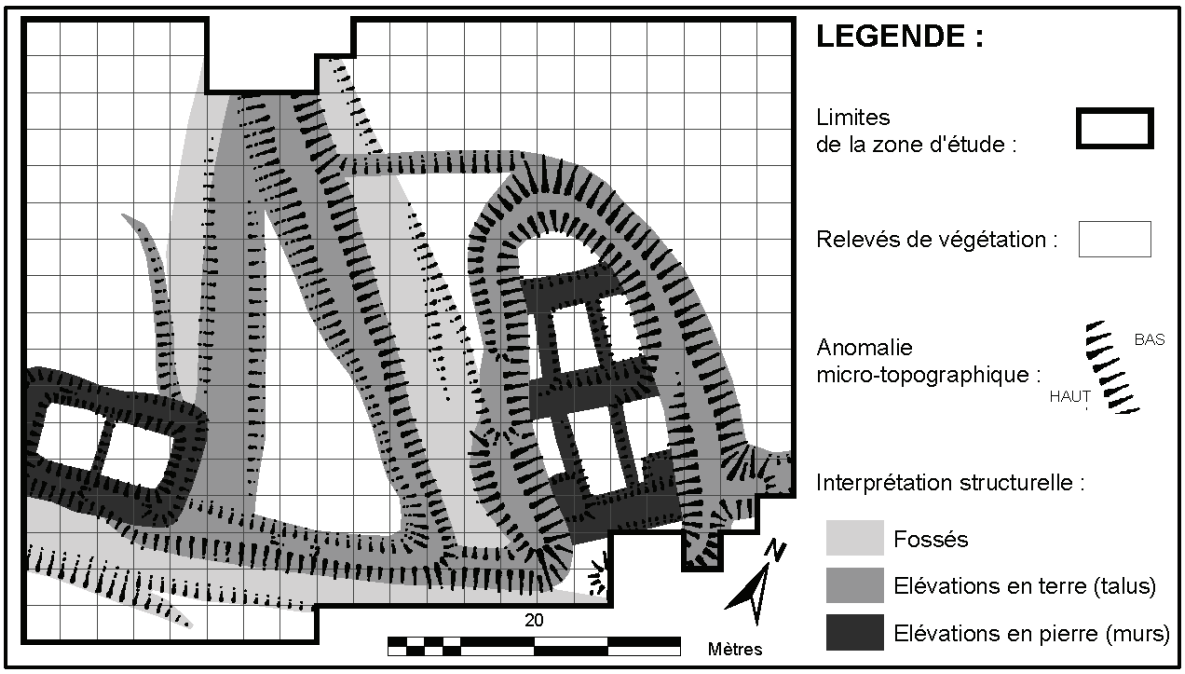


Figure 42 - Interprétation archéologique structurelle des structures microtopographiques de la parcelle 110 du site du Goënidou

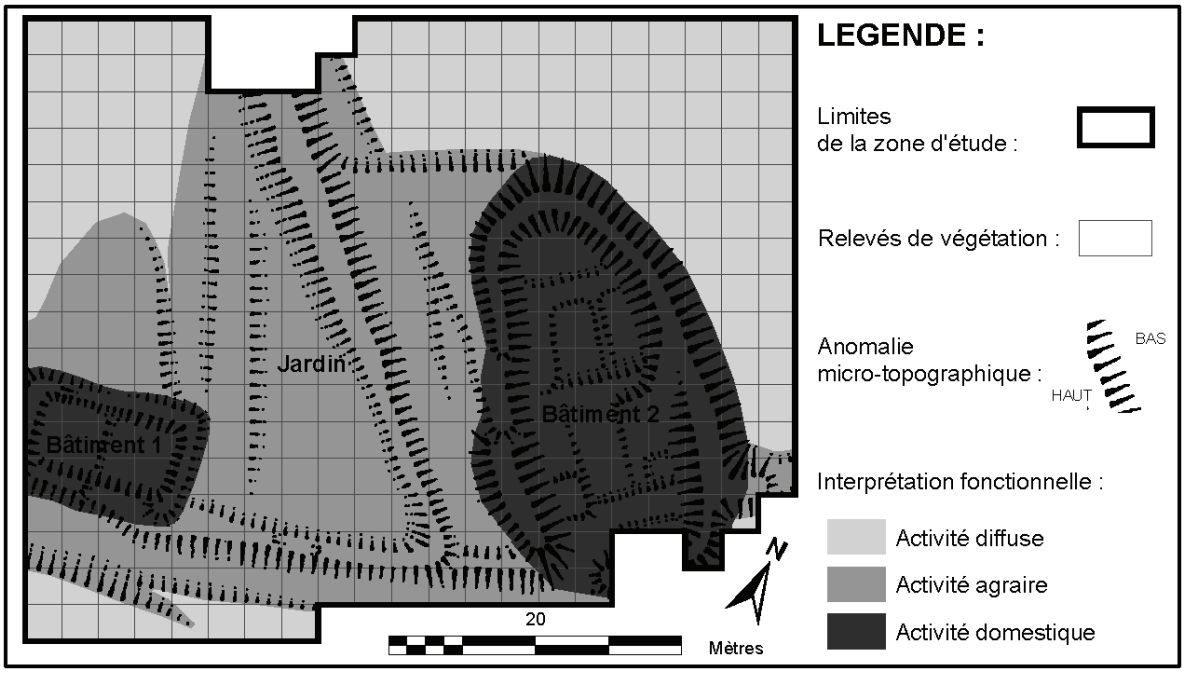


Figure 43 - Interprétation archéologique fonctionnelle des structures microtopographiques de la parcelle 110 du site du Goënidou

6.4.2 Site de La Montagne

6.4.2.1 Calage des données de prospections aériennes

Les photographies issues des prospections aériennes de G. Leroux ont été recalées dans un premier temps. Ce calage a été réalisé par J.-C. Meuret. Ceci a permis de localiser avec précision l'enclos avant fouille.

6.4.2.2 Calage des données de fouilles et numérisation

Les parcelles attenantes à la haie (D318 et D324) ont fait l'objet de sondages réalisés par J.-C. Meuret. Ces sondages ont permis de relever sur plans l'emplacement des structures mises au jour. Sur ces plans, la haie a été positionnée ainsi que le point NR1. Il est facile de recaler les données de fouille et de prospection en utilisant ce point, l'orientation de la haie et l'échelle des plans. Le plan subit d'abord une rotation afin d'orienter la haie suivant notre axe « est/ouest » relatif. Une mise à l'échelle est ensuite effectuée. Enfin le plan est positionné sur une haie fictive grâce au point NR1 (coordonnées 0,0).

Une digitalisation des plans est effectuée. Sont ainsi digitalisés les limites de sondages, les structures repérées à la fouille et les limites de l'enclos détectées en prospection aérienne (fig. 44).

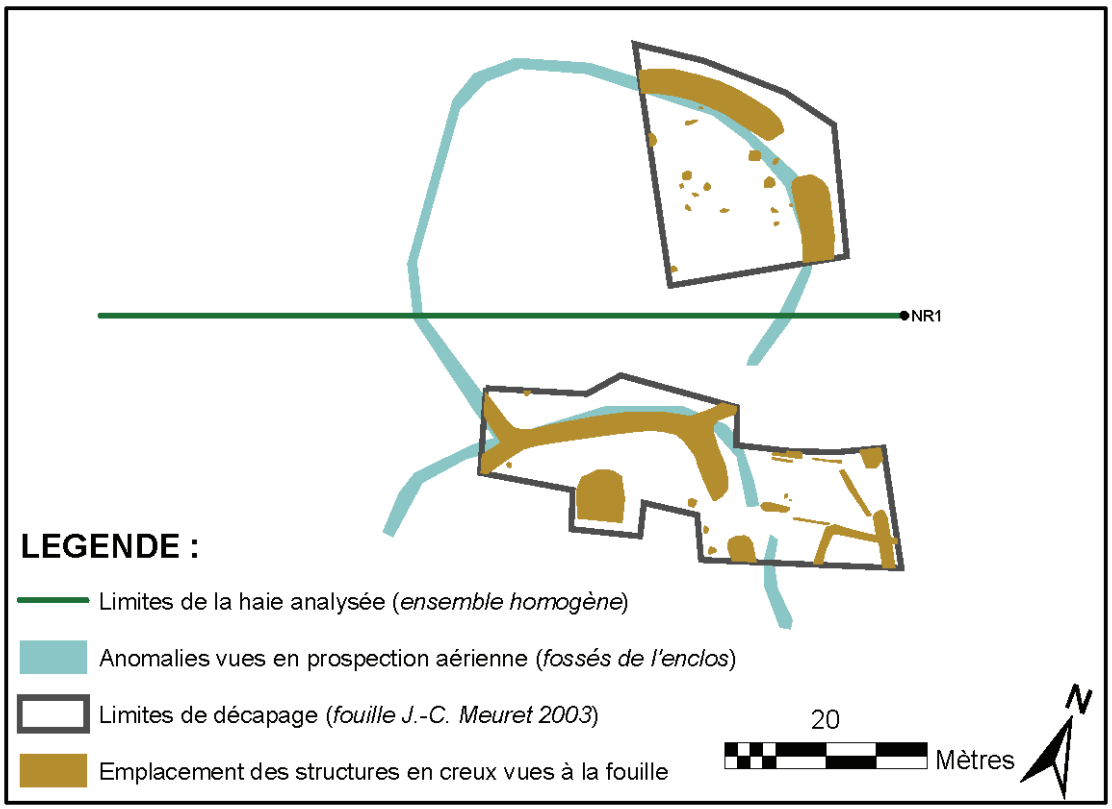


Figure 44 - Plan géoréférencé et digitalisé des structures du site de la Montagne

6.4.3 Site de Kervédan

6.4.3.1 Fouille des relevés

Etant en zone Natura 2000, sur un habitat d'importance communautaire assez sensible à l'érosion, des précautions doivent être prises. Ce site est majeur, classé monument historique. L'étude n'est pas à vocation archéologique stricte. La commission CIRA (commission interrégionale de la recherche archéologique) ayant examiné le projet a donc décidé d'autoriser le dégagement des structures mais pas de les fouiller (sondages non-intrusifs) afin de préserver le site au maximum.

Les premiers centimètres de terre végétale ont été enlevés en mottes d'étrépage[107] de 25 par 50 centimètres. Ceci a été facilement réalisé à la bêche. Cette technique permet d'utiliser ces mottes au rebouchage et ainsi de préserver au mieux la végétation et donc empêcher l'érosion des sols (fig. 45). Les sondages se sont ensuite déroulés sur trois jours suivant les méthodes classiques avec l'aide de bénévoles.

Figure 45 - Exemple de sondage rebouché avec des mottes d'étrépage

[107] Technique de génie écologique visant dans le cas de travaux à prélever la végétation et les horizons superficiels de sol associés (contenant la banque de graines) par mottes qui sont replantées après travaux afin de faciliter la reprise végétale.

6.4.3.2 Relevés orthophotographiques

Après les décapages, chaque zone sondée est couverte par une série de photographies verticales. Un cliché de chaque mètre carré est ainsi effectué à la potence.

Pour chaque photographie, quatre points de calage ont été attribués. L'effet de perspective fait que les piquets de surface ne peuvent être utilisés directement pour le calage. Une estimation des points est réalisée par projection mentale des piquets sur le niveau de décapage de base. L'emplacement des angles de chaque mètre carré est ainsi déterminé.

Les coordonnées attribuées à chaque point sont celles données par le maillage initial de point de référence B0.

Les photographies sont alors redressées sous Didger 3.0. La méthode utilisée est celle des « natural cubic spline ». Cette méthode permet de corriger la distorsion des photographies due à l'optique ou à une légère inclinaison de la potence. Cette méthode ne laisse pas de résidus au niveau des points de calage. Les points de calage se retrouvent donc exactement à leur place théorique après redressement. Les photographies redressées sont rognées en fonction des quatre points de calage. Ces images sont accompagnées de fichiers de géoréférencement permettant un placement automatique des photographies dans un SIG.

Les photographies sont importées sous Arcgis. Elles servent alors de base pour la réalisation des plans conjointement aux interprétations effectuées sur le terrain.

Les plans se font par digitalisation d'après les photographies. Les éléments digitalisés sont les structures et les différents horizons remarqués.

6.4.4 Site de Pont-Calleck

6.4.4.1 Fouille des relevés

La forêt de Pont-Calleck est classée au titre de site pittoresque de la vallée du Scorff. Ce classement n'a cependant eu que peu de répercussions sur le protocole des sondages. En effet, ceux-ci sont réalisés en pleine forêt et non dans la vallée. Comme pour Kervédan, l'étude n'est pas à vocation archéologique stricte. Afin de préserver le site au maximum, la commission CIRA a donc autorisé le dégagement des structures sans les fouiller (sondages non-intrusifs).

Les sondages se déroulent par passes successives. Cette opération est réalisée à la rasette et la truelle. La pioche est utilisée lorsque aucun artéfact n'est visible. Il est souvent nécessaire d'utiliser le sécateur face au grand nombre de racines. Les artéfacts sont collectés par mètre carré, pour chaque passe. La fouille s'arrête à l'apparition de structures. Les structures mises au jour sont dégagées mais non sondées. Une fois l'ensemble des informations de terrain collecté, les sondages ont été rebouchés.

Cette fouille s'est déroulée en deux campagnes d'une semaine. Sept bénévoles sont intervenus sur l'ensemble des deux campagnes.

6.4.4.2 Relevés orthophotographiques

Les relevés sont photographiés verticalement par mètre carré à chaque changement de sédiment ou chaque fois qu'il s'avère nécessaire de procéder à un enlèvement de blocs. Une

fois les décapages terminés, chaque zone sondée fait l'objet d'une couverture de photographies verticales.

A la fin de chaque sondage, les coupes passant par les pieds de fragon sont rectifiées puis interprétées. Des photographies mètre par mètre sont alors effectuées.

Pour les photographies de décapages, les coordonnées de chaque point sont attribuées par rapport à l'intersection des coupes du pied de fragon (0,0). Ces coordonnées sont exprimées en mètres. Elles peuvent être négatives.

Pour les photographies de coupes, il est nécessaire de connaître la position verticale des points de carroyage. A la fin de chaque sondage, une lunette de chantier est implantée. L'altitude relative de chaque point de carroyage en haut et bas de coupe est ainsi mesurée. Cette mesure est utilisée dans l'attribution des coordonnées lors du redressement.

Les photographies et la photo-interprétation suivent la même méthode que pour le site de Kervédan. La différence réside dans le fait que chaque sondage a son propre système de coordonnées et donc son propre projet SIG.

6.5 Attribution de variables d'environnement archéologique

6.5.1 Aux relevés

Pour les sites du Goënidou et de Kervédan, il est très facile, grâce au SIG, d'attribuer des variables d'environnement archéologique à chaque relevé de végétation.

Il est utile de savoir si un type de structure est présent dans un relevé. Il suffit pour cela de sélectionner chaque type de structure et de les exporter isolément dans un shapefile. Ce fichier est ensuite croisé à celui des relevés par la fonction *Polygon in Polygon analysis* de l'outil *Hawth's Analysis Tools*[108]. La surface du relevé occupée par chaque structure est alors récupérée. Ces données sont ensuite transformées en présence/absence. Toute valeur différente de 0 est alors attribuée à 1.

Il est aussi possible de calculer la distance des relevés à ces structures. Des grilles de distance en ligne droite aux structures sont créées à l'aide la fonction *Distance* de l'outil *Spatial Analyst*. La valeur minimale de cette grille au sein d'un relevé est celle de la distance minimale du relevé à une structure (à un demi pixel près). Cette valeur est attribuée aux relevés par la fonction *Zonal Statistics (++)* de l'outil *Hawth's Analysis Tools*. Pour plus de facilité d'interprétation, ces distances sont transformées en proximité. Le calcul utilisé est le suivant :

$$P = \frac{1}{D+1}$$

Où : D est la distance et P la proximité

6.5.2 Aux prélèvements de sol

Pour chaque prélèvement de sol, il est essentiel d'attribuer des variables d'environnement archéologique. Contrairement aux relevés, les prélèvements sont ponctuels. L'attribution de

[108] Téléchargeable sur http://www.spatialecology.com/.

variables peut se faire de manière directe à partir du SIG ou indirectement via les relevés. La deuxième solution est plus intéressante dans le cadre d'analyses conjointes sur les variables de végétation, de sol et de contexte archéologique associé. Une jointure spatiale est alors réalisée entre relevés et prélèvements. Les mesures réalisées au niveau des relevés sont ainsi attribuées aux prélèvements de sol.

6.6 Analyse statistique des données

L'ensemble des analyses statistiques est effectué à l'aide du logiciel statistique opensource « R »[109] utilisant un langage de programmation statistique proche de « S+ ».

6.6.1 Comparaison de la distribution observée de pieds d'une espèce à un modèle spatial aléatoire

Dans le cas de relevés d'implantation de pieds d'espèces comme sur le site de La Montagne, il est possible d'analyser la distance moyenne de ces pieds aux structures archéologiques. Le but de l'étude est de valider statistiquement la proximité des pieds de l'espèce observée aux structures.

Il est nécessaire de définir les limites de la zone d'étude. Dans le cas du site de La Montagne, cette zone d'étude est linéaire : la haie analysée. Pour chaque espèce, un nombre *n* de pieds ponctuels ont été cartographiés au sein de cette zone. Les structures (enclos, fossés) sont cartographiés à partir des données de prospection aérienne, la fouille de l'ouest de l'enclos n'ayant pas été réalisée.

Pour chaque espèce, la distance minimale de chaque pied aux structures est calculée. Les distances sont mesurées par rapport aux limites de ces structures. Des distances nulles sont attribuées aux pieds poussant dans ces structures polygonales et sur leurs limites (fossés comme enclos). La distance moyenne des pieds observés aux structures est calculée.

Les *n* pieds sont alors distribués aléatoirement au sein de la zone d'étude. Pour chacun de ces points aléatoires, la distance aux structures est mesurée. La distance moyenne des *n* points est calculée. Cette opération est répétée 10 000 fois et aboutit au calcul d'autant de distances moyennes aléatoires.

L'analyse compare la distance moyenne observée des *n* pieds aux structures aux distances moyennes aléatoires. La proportion de distances moyennes aléatoires inférieures à celle observée renseigne sur la part possible du hasard dans la proximité observée des pieds aux structures (et respectivement la proportion de distances supérieures pour l'éloignement).

6.6.2 Comparaisons de valeurs physico-chimiques moyennes par permutations entre relevés et témoins appariés

Lorsque les prélèvements de sols se limitent à des réplicats sous les pieds d'une espèce et à des témoins (site de Pont-Calleck), il est nécessaire d'analyser les différences physico-chimiques par des analyses statistiques. Il faut pouvoir comparer les analyses entre témoins et relevés mais aussi entre horizons. La chimie locale peut être différente entre les zones de

[109] Logiciel Open Source téléchargeable sur http://www.r-project.org/.

réplicats/témoins. Il n'est donc pas possible de faire une comparaison de moyenne classique. La seule technique statistique fiable est de faire des permutations entre échantillons appariés. Les données appariées sont redistribuées aléatoirement un grand nombre de fois. La différence de moyennes observées est alors comparée aux différences mesurées lors de ces nombreuses distributions aléatoires. La proportion d'écarts entre les moyennes aléatoires supérieures à l'écart observé donne une information sur la part possible que peut jouer le hasard dans un tel écart.

L'appariement des données peut se faire entre relevés et témoins au sein d'un même horizon ou tous horizons confondus. Cela permet de mettre en évidence des différences de physico-chimie entre les zones de présence et d'absence de la plante. L'appariement peut aussi se faire entre les différents horizons. Dans ce cas, l'analyse permet de mettre en évidence les variations verticales de physicochimie des sols entre horizons sous relevés, sous témoins ou de manière globale.

Une telle analyse permet d'évaluer la dynamique verticale des sols et de donner des informations sur les cycles biogéochimiques. Notamment, cela permet de voir si ces cycles sont différents sous fragon. Les caractéristiques de la physico-chimie des horizons profonds, et donc des horizons archéologiques, peuvent aussi être étudiées.

6.6.3 Croisements des différents types de données en même temps (AFM)

Pour les sites ayant fait l'objet de relevés (Goënidou et Kervédan), il est possible de réaliser une analyse multivariée. Le meilleur outil pressenti pour analyser ces données est l'analyse factorielle multiple (AFM) (Escofier & Pagès, 2008). Elle permet d'analyser des variables qualitatives comme quantitatives. A la différence de l'analyse factorielle de données mixtes (AFDM), l'AFM permet d'analyser les variables par groupes. Le fonctionnement de l'AFM est le suivant. Chaque groupe de données qualitatives est soumis à une analyse en composante multiple (ACM). Les groupes de données quantitatives sont analysées par analyse en composantes principales (ACP). L'AFM a proprement dit est une ACP pondérée sur ces ACP et ACM. Cette caractéristique permet de donner la même importance à des groupes ne contenant pas le même nombre de variables. Les groupes de données quantitatives et qualitatives peuvent être analysés conjointement à travers un graphique de carré des liaisons avec les axes factoriels ou par la représentation des axes de chaque analyse séparée sur les axes de l'AFM. Les variables qualitatives issues de l'ACM sont analysées dans l'espace des relevés. Les variables quantitatives de l'ACP sont interprétées à travers leurs liens sur le cercle des corrélations. Comme toute analyse factorielle « à la française », il est possible d'ajouter des variables supplémentaires à l'analyse. Celles-ci aussi sont ajoutées sous forme de groupes. Ils ne rentrent pas dans le calcul des facteurs de l'AFM. Ils sont insérés uniquement à titre illustratif.

Dans le cas présent, les données de typologie archéologique sont soumise à une ACM et les données d'abondance des espèces à une ACP (sours forme d'indices de Van der Maarel). Ces deux groupes de données font l'objet de l'AFM à proprement parlé. Ils ont chacun un poids équivalent dans le calcul des axes d'inertie. Cela permet de maximiser les liens entre les

deux groupes de données. Il a été décidé d'insérer les données de biodiversité, de biométrie, de proximité aux structures, de physico-chimie des sols et d'écologie dans l'analyse en tant que groupes supplémentaires. Elles sont utilisées pour expliquer les liens visibles entre la typologie des structures archéologiques et l'abondance des espèces.

Ces analyses sont réalisées à l'aide du package FactomineR[110] développé par le laboratoire de mathématiques appliquées d'Agrocampus Ouest (Rennes).

Conclusion

Pour tous les sites choisis, la flore a été analysée. Pour les sites du Goënidou et de Kervédan, toutes les espèces ont été inventoriées par des relevés phytoécologiques. Sur La Montagne, un repérage des pieds des espèces ligneuses a été effectué. Pour les pieds de fragon de Pont-Calleck, ils ont été cartographiés à partir de photographies verticales. Dans le cas des relevés phytoécologiques, il a été possible de réaliser des synthèses écologiques des relevés en fonction des caractéristiques et des affinités des espèces présentes, à l'aide de requêtes dans une base de données.

Sauf pour le site de La Montagne, tous les sites ont fait l'objet de prélèvements de sols. Pour les sites du Goënidou et de Kervédan, seul l'horizon de sol A1 a été retenu. Pour Pont-Calleck, tous les horizons perçus à la fouille ont été récoltés. Ces échantillons ont ensuite fait l'objet de mesures physicochimiques en laboratoire.

L'analyse archéologique a été différente d'un site à l'autre. Au Goënidou, la parcelle a fait l'objet d'une analyse cartographique. La confrontation avec les résultats de fouilles dans les parcelles attenantes permet une interprétation archéologique comparative de ces anomalies. A Kervédan et Pont-Calleck, les zones étudiées ont été fouillées. Pour le site de La Montagne, le recalage des plans de fouilles antérieures dans les parcelles attenantes à la haie a été effectué.

Toutes ces données ont été synthétisées par des analyses spatiales et statistiques adaptées.

[110] Logiciel libre d'analyse factorielle en R : http://factominer.free.fr/.

Chapitre 7 Relation spatiale entre les structures archéologiques et les espèces végétales actuelles

Pour chaque site étudié, il est tout d'abord utile de vérifier si la flore, au niveau des occupations archéologiques, est différente de celle du milieu environnant. Les résultats sont soumis à des analyses statistiques ou spatiales pour mettre en évidence d'éventuelles corrélations entre les structures archéologiques et la flore.

7.1 Réponse de la strate arbustive (site de La Montagne)

7.1.1 Résultats

7.1.1.1 Analyse cartographique

Pour le site de La Montagne, seule la végétation arbustive a été analysée. Cette étude a permis de dresser des cartes de distribution des pieds de chaque espèce au sein de la haie (annexe 1). Pour chacune de ces cartes, la position de l'enclos y est signalée. L'ensemble de l'information contenue dans ces cartes est synthétisé par la figure 46.

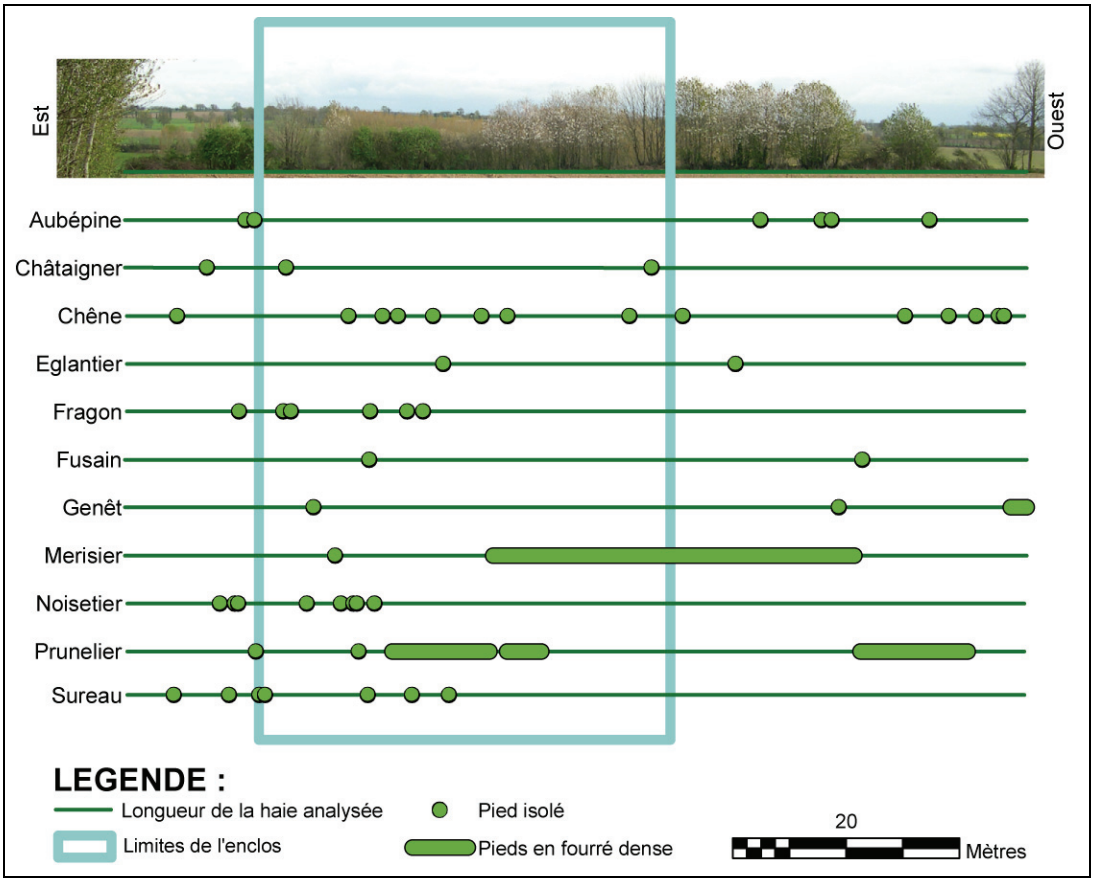


Figure 46 - Relation spatiale entre la localisation des pieds des différentes espèces et l'enclos triple au sein de la haie du site de Visseiche

La consultation de ces cartes permet d'étudier de manière simple la relation spatiale entre ces espèces et l'enclos. Certaines espèces ne semblent pas avoir de répartition particulière vis-

à-vis de l'enclos. Cela semble être le cas pour l'aubépine, l'églantier, le fusain, le genêt et le prunellier. A proximité des fossés de l'enclos, il semble que le châtaigner soit plus fréquent et le chêne moins fréquent que dans le reste de la haie. Au niveau de l'enclos lui-même, on peut noter un comportement différent des espèces entre l'ouest et l'est. Le merisier se développe dans sa partie ouest. La partie est de l'enclos est pour sa part caractérisée par la présence du fragon, du noisetier et du sureau.

7.1.1.2 Analyses statistiques spatiales

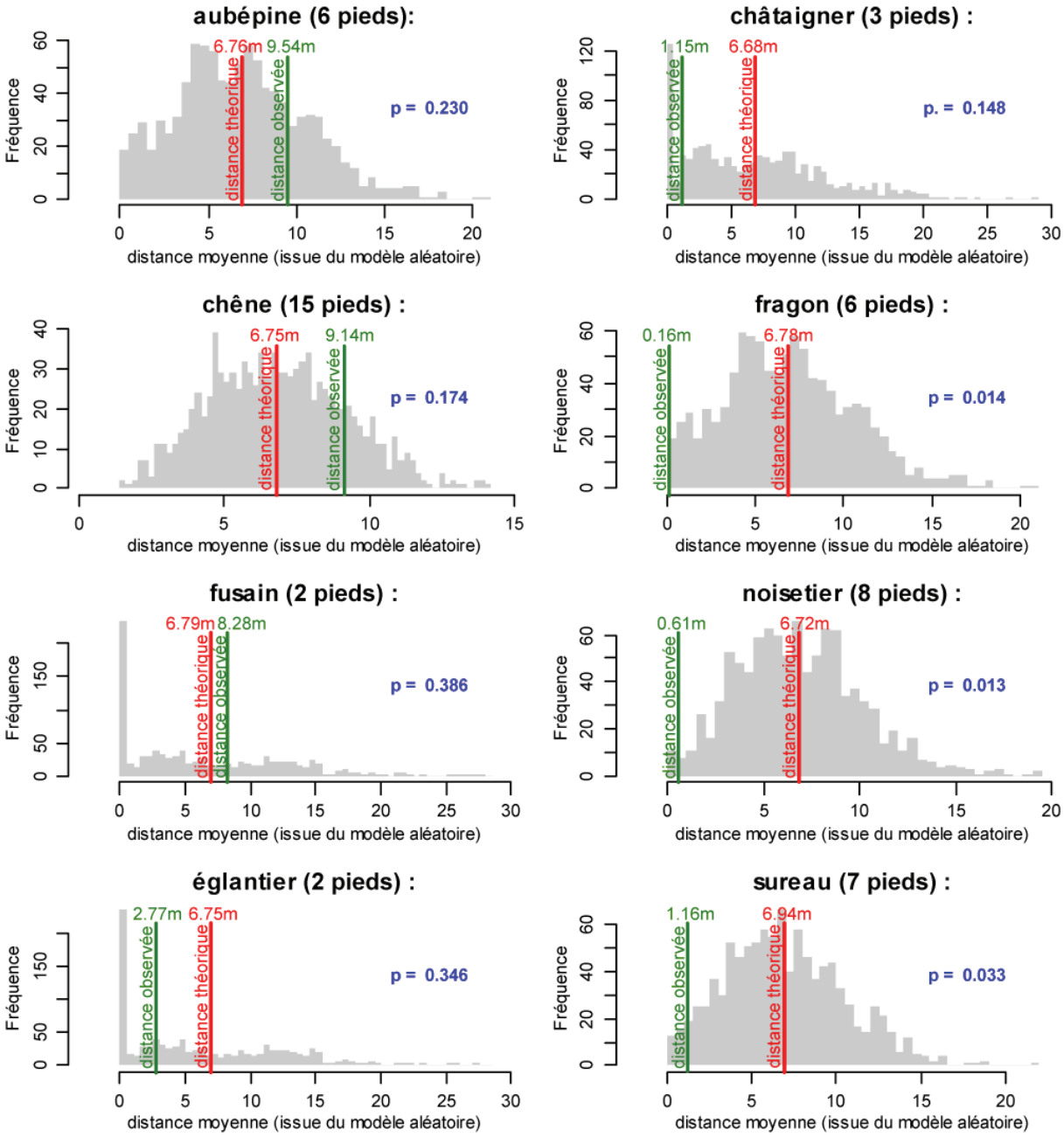


Figure 47 - Comparaison des distances moyennes des espèces ligneuses à l'enclos de Visseiche par rapport au modèle spatial aléatoire

Cette première analyse des cartes reste intuitive, pour confirmer les liens entre les espèces

et l'enclos, il est nécessaire de réaliser des analyses statistiques. Pour les espèces ligneuses autres que le prunellier, le merisier et le genêt dont le repérage des pieds n'a pas été possible, une analyse spatiale a été réalisée (Cf. 6.6.1).

La distance des espèces à l'enclos a tout d'abord été analysée. Pour chaque espèce, la distribution observée des pieds a été comparée à un modèle spatial aléatoire (fig. 47).

A partir de ce modèle, il a été possible de déterminer si la répartition privilégiée de certaines espèces à proximité ou à distance de l'enclos peut être liée au seul fait du hasard. Sur les huit espèces ligneuses analysées, cinq espèces sont plus fréquentes à proximité de l'enclos. Ces espèces sont le noisetier, le fragon, le sureau, le châtaigner et l'églantier. Par opposition, le chêne, l'aubépine et le fusain voient leur fréquence augmenter à distance de l'enclos.

L'analyse spatiale montre que la distance moyenne des pieds de fragon à l'enclos est de 0.16m (5 pieds sur 6 sont dans l'enclos). La probabilité d'avoir une distance moyenne inférieure en dispersant aléatoirement 6 graines au sein de la haie est de 1.4% (seuil de probabilité pour lequel on peut négliger le hasard : 5%). Il est ainsi possible d'affirmer que les pieds de fragon sont significativement plus présents à proximité de l'enclos.

Pour le noisetier et de sureau, il est aussi possible de rejeter l'hypothèse que la faible distance observée de leurs pieds à l'enclos soit due au hasard.

Concernant les autres espèces, l'hypothèse que leur répartition particulière en termes de distance à l'enclos soit liée au simple fait du hasard ne peut être infirmée.

Un autre modèle a ensuite été développé vis-à-vis, non plus de la distance à l'enclos, mais de la distance aux fossés de l'enclos. La répartition privilégiée de certaines espèces à proximité ou à distance des fossés de l'enclos a ainsi été analysée (tab. 1).

Tableau 1 - Significativité de l'écart des distances moyennes des espèces ligneuses aux fossés de l'enclos de Visseiche par rapport au modèle spatial aléatoire

	distance moyenne aux fossés		
Espèces	**observée**	**théorique**	**p-value**
espèces dont les pieds sont plus fréquents à proximité des fossés de l'enclos			
Châtaigner (3)	1.97	**9.45**	0.007
Noisetier (8)	4.20	**9.27**	0.011
Sureau (7)	4.80	**9.40**	0.036
Fragon (6)	4.87	**9.42**	0.053
Eglantier (2)	7.16	**9.14**	0.447
espèces dont les pieds sont plus fréquents à distance des fossés de l'enclos			
Chêne (15)	**12.62**	9.50	0.075
Fusain (2)	**11.87**	9.53	0.285
Aubépine (6)	**9.40**	9.37	0.453

nb: Espèce (nombre de pieds)

Ce tableau montre que les pieds de noisetier, de châtaigner et de sureau sont significativement distribués à proximité des fossés de l'enclos. Concernant les autres espèces, il apparaît que les pieds de fragon sont distribués à proximité des fossés, et les pieds de chêne à distance. Cependant, l'hypothèse que ces répartitions particulières soient liées au simple fait du hasard ne peuvent, de justesse, être éliminée (p=0.053 et p=0.075).

7.1.2 Discussion

7.1.2.1 Observation de différences de flore sur les structures

Les analyses cartographiques et statistiques montrent que le fragon (*Ruscus aculeatus*), le noisetier (*Corylus avellana*) et le sureau (*Sambucus nigra*) sont, dans cette haie, de bons indicateurs de proximité de l'enclos (fig. 46 et 47). L'enclos enfoui peut donc être repéré dans la haie par la présence de ces trois espèces. De la même manière, le noisetier, le châtaigner et le sureau révèlent par leur présence la proximité des fossés de l'enclos (fig. 48).

D'un point de vue méthodologique, cette démarche réitérée sur les différentes espèces montre clairement que le nombre de pieds distribués à une nette influence sur la distribution des 1000 distances moyennes théoriques (fig. 47). Pour un nombre de pieds faible, le hasard de distribuer tous les pieds dans l'enclos est plus fort. Il y a donc beaucoup de distances moyennes aléatoires égales à 0 (exemple de l'églantier et du fusain). Le hasard de distribuer tous les pieds en dehors de l'enclos est aussi plus fort. Il y a aussi plus de distances moyennes aléatoires élevées. Pour un nombre de pieds plus élevé, les valeurs extrêmes se font plus rares. Il y a moins de chances de voir tous les pieds distribués aléatoirement dans l'enclos ou en dehors (exemple du chêne). En revanche, la distance moyenne théorique reste sensiblement la même quelque soit le nombre de pieds. Elle est calculée à partir des 1000 distributions aléatoires de *n* points. Que *n* soit faible ou fort, le nombre de points utilisés pour le calcul de cette distance moyenne est élevé. Le calcul de cette distance théorique est toujours très fiable.

La distance moyenne seuil pour une p-value de 0.05 varie donc avec le nombre de pieds. Celui-ci équivaut d'un point de vue statistique au nombre de degrés de liberté. Afin d'obtenir la courbe d'évolution de cette distance seuil par rapport au nombre de pieds distribués, un très grand nombre de points (100000) a été distribué aléatoirement au sein de la haie. La distance à l'enclos a été calculée pour chacun d'eux. Ces points ont été associés par groupes de *n* pieds, *n* allant de 1 à 100. Les distances moyennes ont été calculées pour chaque groupe. A partir des tables de distances, il a facilement été possible de voir l'évolution de la distance moyenne seuil pour une p-value de 0.05 en fonction du nombre de pieds (fig. 48).

Cette courbe montre que de 1 à 5 pieds la distance moyenne seuil pour une p-value de 0.05 est de 0 mètre pour la p-value de proximité. Pour que la distance moyenne des pieds observés à l'enclos soit significative, il faudrait donc que celle-ci soit inférieure à 0, ce qui est matériellement impossible. Pour la p-value d'éloignement, les distances moyennes seuil varient franchement dès 1 pied. Ceci est dû au fait que le hasard de distribuer un pied au plus loin de l'enclos, c'est-à-dire à l'extrémité ouest de la haie, est très faible. La probabilité d'en distribuer 2 est encore nettement plus faible. Le comportement statistique est donc nettement différent. Il est plus facile de mettre en évidence des espèces poussant favorablement loin de l'enclos qu'à proximité.

Pour un nombre de pieds supérieurs, les distances moyennes seuils s'éloignent des valeurs extrêmes progressivement jusqu'à tendre vers un plateau, aussi bien pour la p-value de proximité que pour la p-value d'éloignement.

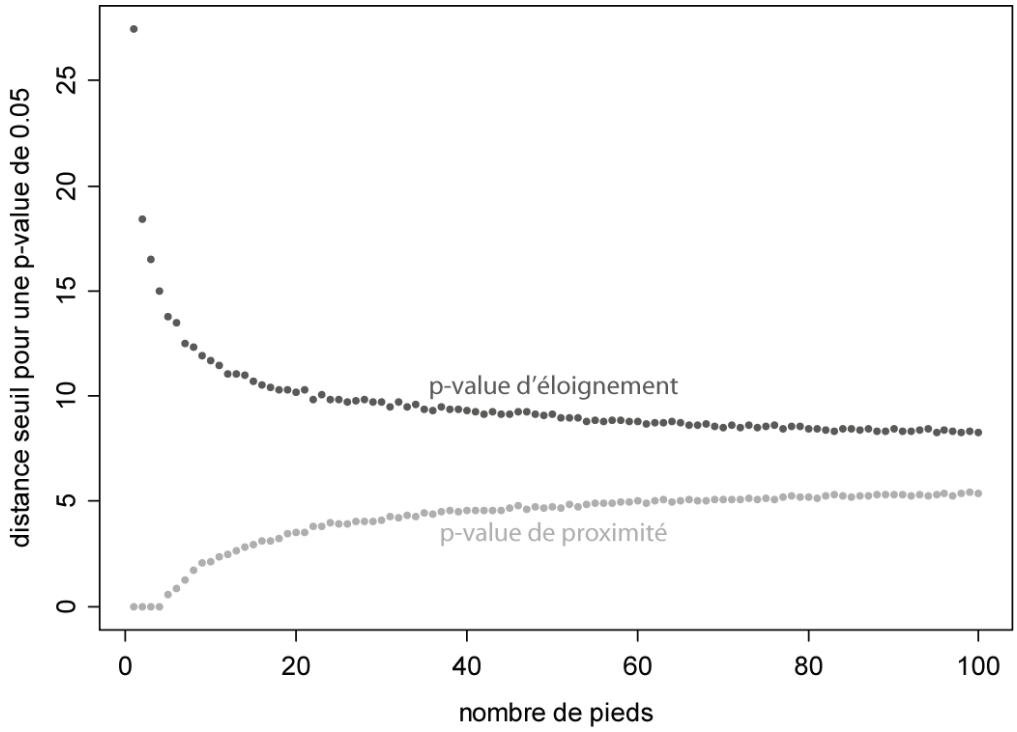


Figure 48 - Variation des seuils de significativité (p-value=0.05) des distances moyennes à l'enclos de Visseiche en fonction du nombre de pieds observés

7.1.2.2 Nécessité de prise en compte de l'autocorrélation spatiale

En regardant la carte du fragon par exemple, il est clairement visible que les pieds sont groupés. Il y a autocorrélation spatiale positive. Ce phénomène est lié au fait qu'un pied est le descendant d'un autre. L'emplacement d'un pied est donc dépendant des autres, une graine d'un pied peut tomber à proximité et donner naissance à un autre pied. Il n'y a donc pas indépendance dans la dispersion des pieds. Le modèle présenté précédemment est donc à utiliser avec précaution. D'un point de vue analytique, il est possible de dire que les pieds de fragons ne sont pas dispersés par hasard vis-à-vis de l'enclos. Cependant, il n'est pas à exclure qu'une graine de fragon soit arrivée par hasard précisément à proximité de l'enclos. Celle-ci a pu donner naissance à un pied. Ce pied peut avoir fructifié à maturité. Les graines, dispersées à proximité, ont pu donner naissance à d'autres pieds présentant les mêmes caractéristiques de proximité à l'enclos. Les p-values obtenues précédemment sont ainsi certainement sous-estimées du fait de ce biais.

Pour éviter ce biais, il est nécessaire d'utiliser un modèle de distribution, non pas aléatoire, mais agrégatif. Il faut distribuer aléatoirement le premier pied. Le deuxième pied est alors distribué à partir du premier pied. L'angle de dispersion est tiré au sort. La distance de propagation est choisie au hasard au sein de la matrice de distances entre pieds observés. Le troisième pied est alors distribué aléatoirement à partir du premier ou du deuxième pied suivant la même loi de distribution. Les pieds suivants sont eux-aussi distribués suivant le même principe. Seule une distribution aléatoire orientée de ce type permet de s'affranchir du biais statistique créé par l'autocorrélation spatiale. Un groupe de fonctions R a été créé pour réaliser cette analyse (annexe 2).

La répartition des espèces par rapport à l'enclos a été analysée suivant ce nouveau modèle (tab. 2).

Tableau 2 - Significativité de l'écart des distances moyennes des espèces ligneuses à l'enclos de Visseiche par rapport au modèle spatial aléatoire agrégatif

	distance moyenne à l'enclos		
Espèces	**observée**	**théorique**	**p-value**
espèces dont les pieds sont plus fréquents à proximité de l'enclos			
Châtaigner (3)	1.15	**6.21**	0.153
Fragon (6)	0.16	**5.65**	0.217
Sureau (7)	1.16	**5.55**	0.279
Noisetier (8)	0.61	**6.11**	0.284
Eglantier (2)	2.77	**5.53**	0.378
espèces dont les pieds sont plus fréquents à distance de l'enclos			
Chêne (15)	**9.14**	6.13	0.095
Aubépine (6)	**9.54**	7.09	0.268
Fusain (2)	**8.28**	7.72	0.436

nb: Espèce (nombre de pieds)

Il apparaît que ce nouveau modèle est nettement plus sélectif. Plus aucune espèce n'est significativement liée à l'enclos. Seul le chêne obtient une probabilité que la différence observée soit uniquement due au hasard inférieure à 10%.

Pour la distance aux fossés, les résultats avec le nouveau modèle sont consignés dans le tableau 3.

Tableau 3 - Significativité de l'écart des distances moyennes des espèces ligneuses aux fossés de l'enclos de Visseiche par rapport au modèle spatial aléatoire agrégatif

	distance moyenne aux fossés		
Espèces	**observée**	**théorique**	**p-value**
espèces dont les pieds sont plus fréquents à proximité des fossés de l'enclos			
Châtaigner (3)	1.97	**9.30**	0.058
Sureau (7)	4.80	**8.66**	0.073
Noisetier (8)	4.20	**9.34**	0.092
Fragon (6)	4.87	**8.81**	0.189
Eglantier (2)	7.16	**8.64**	0.402
Aubépine (6)	9.40	**9.50**	0.563
espèces dont les pieds sont plus fréquents à distance des fossés de l'enclos			
Chêne (15)	**12.62**	9.06	0.040
Fusain (2)	**11.87**	10.06	0.425

nb: Espèce (nombre de pieds)

Il apparaît que le chêne pousse significativement à distance des fossés de l'enclos. Pour cette espèce, le nouveau modèle a fait passer la probabilité de presque significative (p=0.075) à significative (p=0.040). Les pieds de châtaigner, de sureau et de noisetier et de fragon étaient considérés comme distribués significativement à proximité des fossés suivant l'ancien modèle. Dans ce nouveau modèle, l'hypothèse que ces répartitions particulières soient liées au simple fait du hasard ne peut être éliminée. Le châtaigner avec seulement trois pieds arrive toutefois en limite de significativité (p=0.058).

Ce modèle semble plus juste que le précédent. En regardant les cartes de distribution, il apparaît que ce sont justement le chêne et le châtaigner qui semblent le plus liés aux fossés alors qu'aucune espèce ne semble vraiment liée à l'enclos. Le fragon, le noisetier et le sureau sont plus liés à la partie orientale de l'enclos et non à l'enclos dans son entier. Cette différence

peut être due à un usage ou des structures particulières dans cette partie de l'enclos. La fouille a mis au jour la présence d'une avant-cour accolée à l'est de l'enclos triple. Cette structure concentre la quasi-totalité du mobilier métallique (Meuret, 2003). Elle semble avoir été le siège des occupations domestiques plus que l'enclos lui-même. Le fragon, le noisetier et le sureau peuvent être liés aux activités ayant eu lieu dans cette avant-cour. Pour confirmer cette hypothèse, il faudrait étendre la fouille à l'ensemble de l'enclos nord et de ses abords. Les sols d'occupation sont peu ou pas conservés. Pour mettre en évidence des différences d'usages, il serait utile d'effectuer des analyses de sols.

7.2 Réponse de l'ensemble de la flore vasculaire à l'échelle du site (site du Goënidou)

7.2.1 Résultats

Pour le site du Goënidou, l'ensemble des espèces vasculaires a été étudié. Concernant la fougère aigle (*Pteridium aquilinum*), des cartes biométriques ont été dressées (annexe 3). Pour les autres espèces, des cartes d'abondance ont été élaborées (annexe 4). La variation spatiale de la biodiversité est abordée par les cartes de richesse spécifique, de diversité de Shannon et d'équitabilité de Pielou (annexe 5). Sur chaque carte, l'emplacement des anomalies microtopographiques relevées est reporté.

Afin de synthétiser ces résultats cartographiques, une analyse factorielle multiple (AFM) a été effectuée entre les abondances d'espèces et la présence/absence de structures (Cf. 6.6.3).

7.2.1.1 Synthèse des variables biométriques

Avant de réaliser cette analyse, il a été nécessaire d'intégrer la fougère aigle. Cette espèce est présente abondamment sur l'ensemble de la zone d'étude. Il a été nécessaire de réaliser des mesures biométriques sur cette espèce à la place des indices d'abondances. Quatre types de mesures ont été réalisés. Ces données sont consignées dans une matrice (fig. 49).

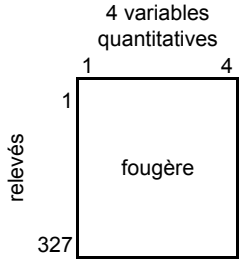


Figure 49 - Structure des données de biométrie de la fougère

Afin de ne pas donner trop de poids dans l'analyse à cette espèce, il a été nécessaire de réaliser une analyse en composantes principales (ACP) préliminaire sur ce tableau (fig. 50).

Cette figure montre que le premier axe factoriel de l'ACP, synthétise à lui seul plus de 75% de l'information des quatre mesures biométriques. Cet axe est assez similaire à la mesure de biomasse. C'est un compromis entre la masse moyenne d'une fronde ou sa hauteur et le nombre de ces frondes. Cette variable synthétique peut être utilisée pour caractériser la dynamique de la fougère. Elle est ajoutée au tableau d'abondance des autres espèces.

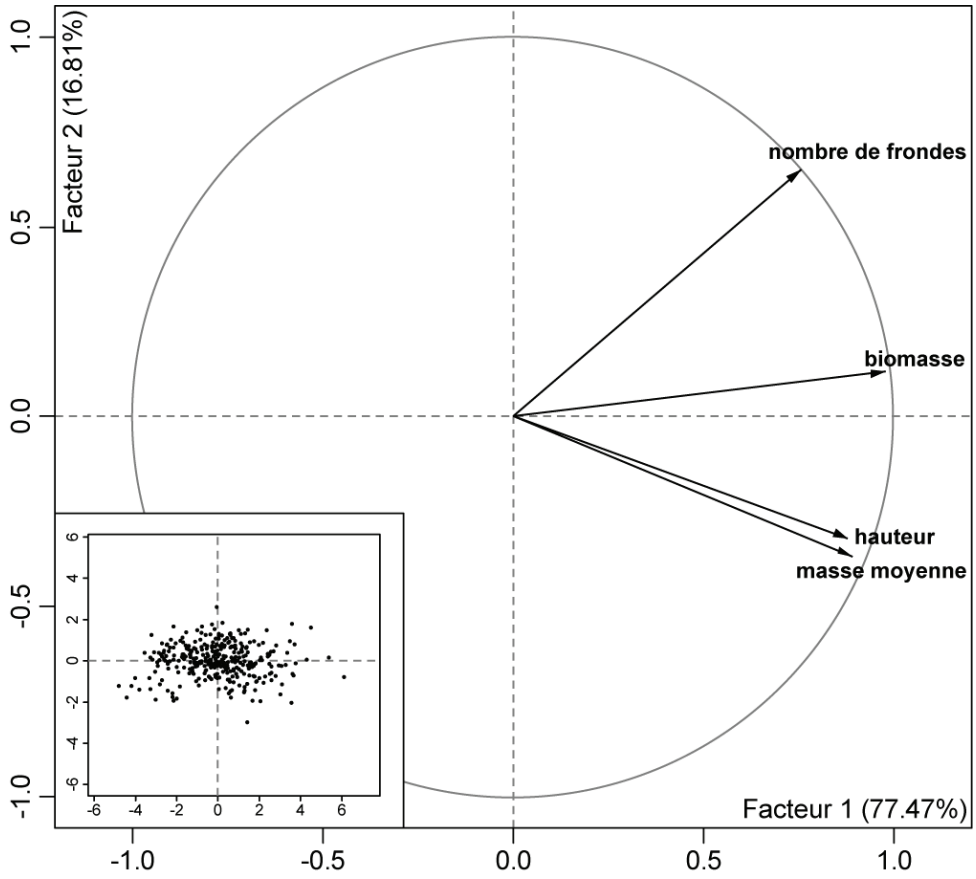


Figure 50 - Cercle des corrélations sur le plan 1-2 de l'ACP de la biométrie de la fougère aigle (en encadré : allure du nuage des relevés)

A partir de ce tableau, il est enfin possible de réaliser l'AFM entre les abondances des espèces et la présence/absence de structures.

7.2.1.2 Analyses séparées

L'analyse factorielle multiple commence par l'analyse séparée des différents groupes de données. Dans le cas du site du Goënidou, les données sont structurées en sept groupes (fig. 51).

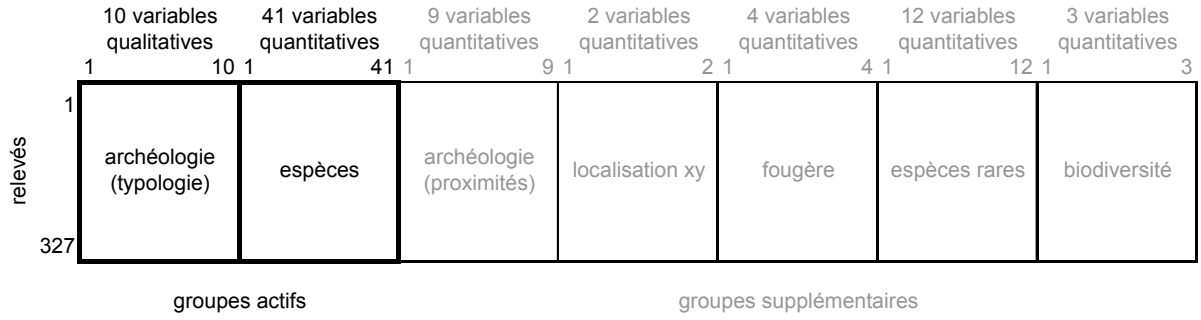


Figure 51 - AFM du Goënidou : structure des données utilisées

L'analyse factorielle multiple commence par une analyse en composantes multiples (ACM) des groupes de variables qualitatives et une analyse en composantes principales

(ACP) des groupes de variables quantitatives. Le but de l'étude étant de mettre en évidence les relations entre la typologie archéologique et les abondances/dominances des espèces, seuls ces deux groupes ont été utilisés comme groupes actifs de l'AFM. Les autres groupes sont utilisés comme supplémentaires. Ils ne rentrent pas dans le calcul de l'AFM. Ils sont utilisés à titre illustratif. La proximité aux structures n'a pas été utilisée comme groupe actif afin de ne pas jouer un rôle de doublon avec la typologie. La localisation xy dans l'espace, les variables biométriques de la fougère, les espèces rares présentes dans moins de 2% des relevés et les variables de biodiversité ont aussi été insufflées dans l'AFM à titre supplémentaire. Toutes ces variables supplémentaires sont quantitatives et relèvent donc de l'ACP. Pour les deux groupes actifs, l'analyse est différente. La typologie des structures est un ensemble de variables qualitatives et relève donc de l'ACM. Les espèces sont pour leur part codées de manière quantitative (indices de Van der Maarel et facteur 1 de l'ACP précédente pour la fougère). Elles relèvent donc de l'ACP. Le résumé des ACM et ACP de ces deux groupes actifs est donné dans le tableau 4.

Tableau 4 : AFM du Goënidou : inerties des analyses séparées des groupes actifs

		axe 1	axe 2	axe 3	axe 4	axe 5	axe 6	axe 7	axe 8	axe 9	axe 10
Valeur propre	ACM	0.44	0.31	0.14	0.09	0.04	0.04	0.03	0.01	0.01	0.00
	ACP	5.70	4.07	2.96	2.04	1.67	1.52	1.40	1.29	1.24	1.18
%	ACM	40.31	27.79	12.81	8.10	3.92	3.49	2.35	0.74	0.49	0.00
	ACP	13.90	9.92	7.22	4.98	4.08	3.70	3.42	3.14	3.02	2.87
% cumulé	ACM	40.31	68.09	80.91	89.01	92.93	96.42	98.77	99.51	100.00	100.00
	ACP	13.90	23.82	31.04	36.02	40.10	43.81	47.23	50.37	53.38	56.26

A première vue, un déséquilibre apparaît nettement entre les deux analyses. L'ACM a moins de variables (10). Une grande partie de l'information de la typologie peut être résumée par les deux premiers facteurs (68%). Pour la végétation, le nombre de variables est plus élevé (41). Les premiers facteurs de l'ACP ne résument que 23% de l'information. Il y a donc une plus grande richesse d'information dans la flore que dans la typologie des structures. Toutefois, ce déséquilibre n'est pas gênant car il est pris en compte dans l'AFM. Le même poids est donné à la typologie et à la végétation. L'AFM est une ACP pondérée sur les résultats de ces deux analyses.

7.2.1.3 Signification des axes de l'AFM

Les résultats d'inertie de l'AFM sont consignés dans le tableau 5.

Tableau 5 - AFM du Goënidou : inertie des axes, globale et ventilée par groupe actif

	axe 1	axe 2	axe 3	axe 4	axe 5	axe 6	axe 7	axe 8	axe 9	axe 10
Ensemble en %	18.41	9.80	7.35	5.62	4.58	3.41	2.81	2.58	2.49	2.35
Ensemble	1.78	0.95	0.71	0.54	0.44	0.33	0.27	0.25	0.24	0.23
Groupe 1 (ACM)	0.95	0.90	0.47	0.57	0.60	0.65	0.26	0.29	0.43	0.15
Groupe 2 (ACP)	0.95	0.82	0.93	0.86	0.90	0.89	0.95	0.78	0.95	0.88

Il ressort de ce tableau que les valeurs propres de l'AFM décroissent de manière assez régulière. Il n'est donc pas possible de mettre en évidence des facteurs bien marqués. La

décomposition de ces facteurs par groupe montre en revanche que les deux premiers facteurs correspondent à des inerties importantes des deux groupes. Les facteurs suivants sont spécifiques de l'ACP. Les liens entre archéologie et végétation sont donc essentiellement consignés sur les deux premiers facteurs. On peut donc limiter l'étude au premier plan factoriel. Il est alors possible de regarder la liaison des deux premiers facteurs de chaque groupe avec le premier plan factoriel de l'AFM (fig. 52).

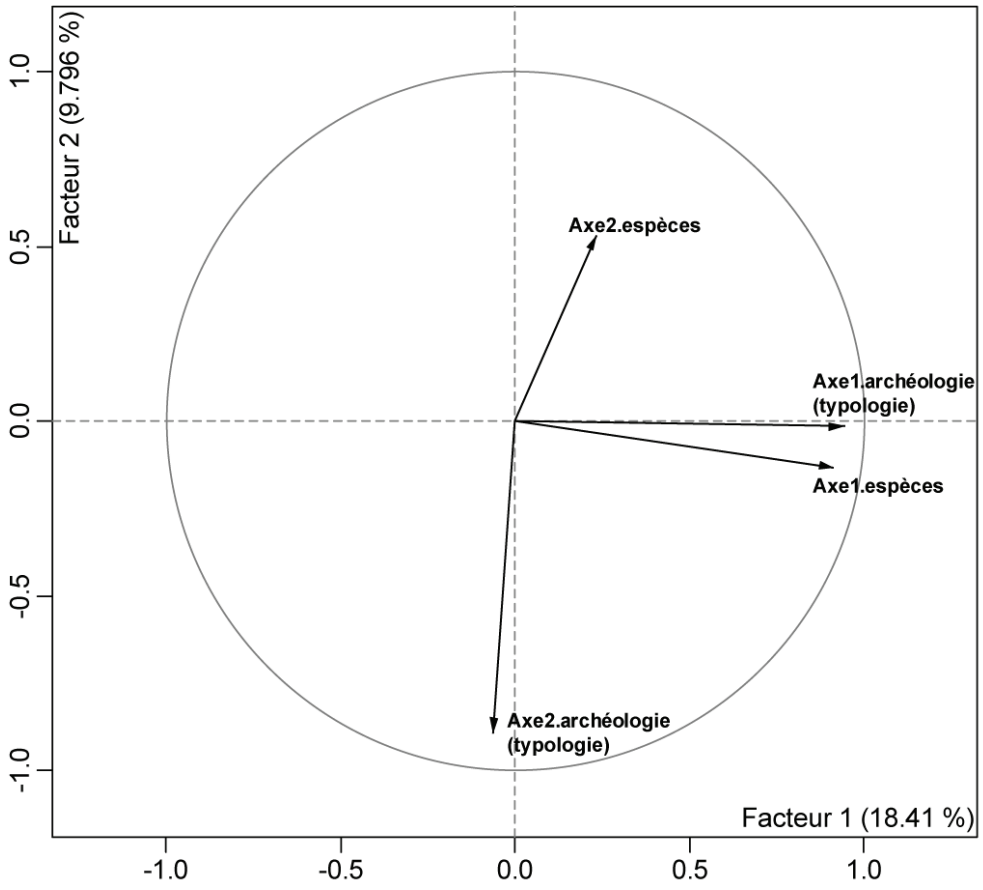


Figure 52 - AFM du Goënidou : représentation des deux premières composantes principales de chaque groupe actif par leur corrélation avec le premier plan factoriel

Ce graphique nous montre que les premiers axes de chaque analyse séparée sont très corrélés au premier axe factoriel de l'AFM. Cet axe explique la principale variation de typologie mais aussi de flore. Il existe donc un lien net entre structures archéologiques et flore. Le deuxième axe de l'AFM est pour sa part très lié à la typologie. Il est aussi lié à la flore mais de manière moins marquée. Le deuxième axe de l'ACP de la flore est donc lié en partie à la typologie mais aussi à d'autres facteurs.

Il est ensuite possible d'étudier la liaison de chaque groupe aux deux premiers axes de l'AFM via le graphique du carré des liaisons (fig. 53).

Ce graphique nous confirme que les espèces et la typologie sont très liées et tout particulièrement par l'axe 1 de l'AFM. Les groupes supplémentaires des espèces rares et de proximité aux structures ont été projetés sur ce graphique. Il apparaît que le groupe des espèces rares n'est pas du tout lié aux deux premiers facteurs. Il était donc judicieux de les exclure de l'analyse. Ces espèces peuvent ne pas du tout être liées à la typologie des

structures contrairement à l'ensemble des autres espèces. Il semble toutefois plus probable que l'absence de lien visible est plus liée à la faible fréquence de ces espèces. Le groupe des proximités aux structures est en revanche très lié la typologie des structures. Ce n'est pas étonnant, étant donné qu'ils représentent approximativement la même information, mais cela permet d'analyser conjointement l'espace des relevés qui relève du qualitatif via la typologie et l'espace des variables qui relève du qualitatif via les proximités.

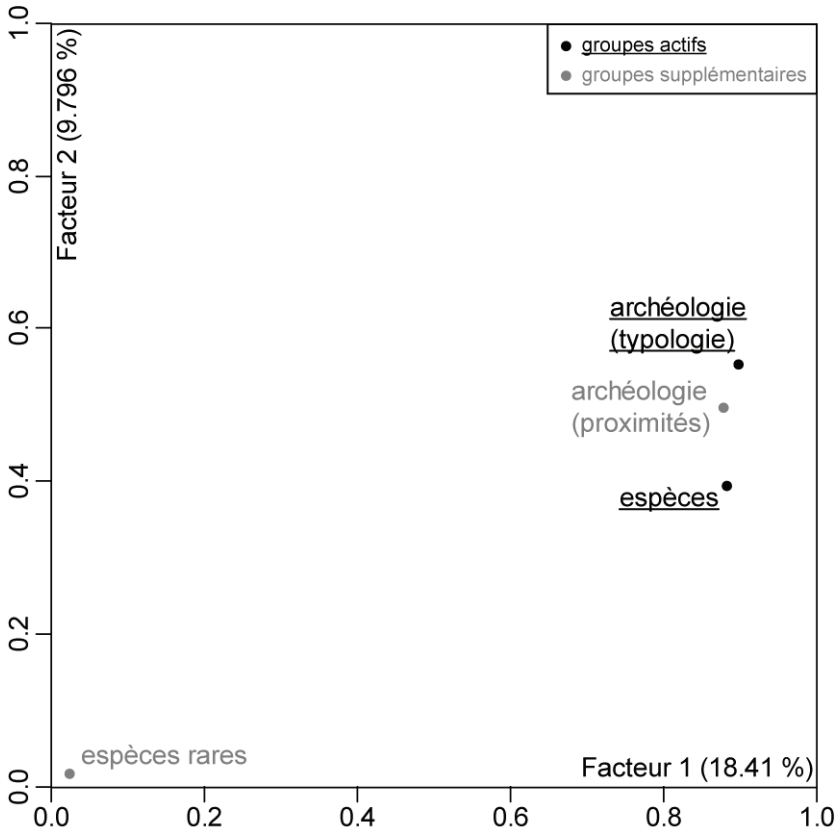


Figure 53 - AFM du Goënidou : carré des liaisons entre les groupes et le premier plan factoriel

7.2.1.4 Interprétation des axes de l'AFM en termes de typologie des structures

L'espace des relevés peut donc être interprété en termes de typologie (fig. 54).

Le nuage des relevés sur le premier plan factoriel est facilement interprétable du point de vue de la typologie. Tous les centres de gravité d'absence de structure ont une valeur négative sur l'axe 1. Au contraire, tous les centres de gravité de présence de structure sont situés sur la droite de cet axe. L'axe 1 est donc clairement un axe de présence/absence de structures. L'axe 2 oppose les centres de gravité des structures bâties (bâtiments, bâtiment 1, bâtiment 2, murs) à ceux des autres types de structures. Cette opposition est visible aussi bien pour les centres de gravité de présence que ceux d'absence (avec une inversion). Toute cette information observée sur les deux axes est clairement lisible si l'on affiche les relevés en fonction des aires d'activité. L'axe 1 montre un gradient entre zone d'activité diffuse, zone d'activité agraire et zone d'activité domestique. L'axe 2 permet d'isoler la zone d'activité agraire. Maintenant que l'espace des relevés est analysé, il est possible d'analyser l'espace des variables.

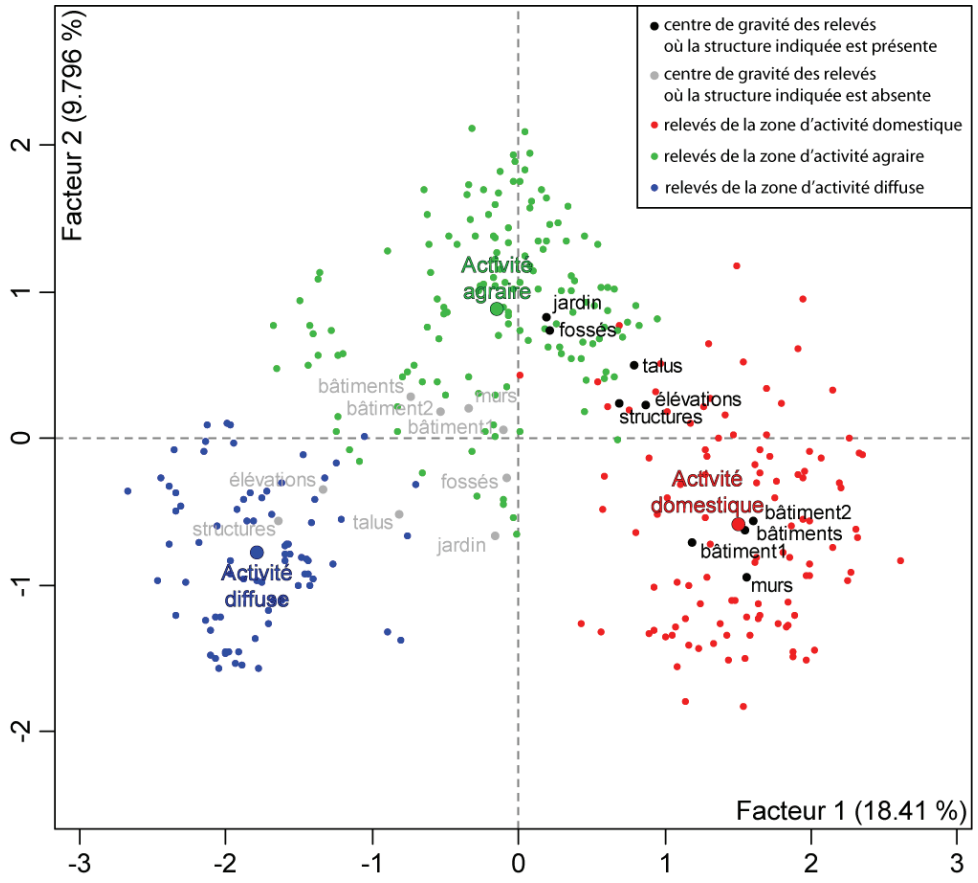


Figure 54 - AFM du Goënidou : représentation de la typologie sur le premier plan factoriel

7.2.1.5 Structuration spatiale des axes de l'AFM

Les données à partir desquelles cette analyse a été réalisée sont spatialisées. Il peut exister des gradients spatiaux jouant un rôle dans la structuration de ces données. Il est donc utile de les analyser avant de poursuivre l'analyse. Ceci peut être effectué en projetant les variables de localisation xy sur le cercle des corrélations conjointement aux variables de proximité (fig. 55).

La projection des variables de proximité montre que la même structuration archéologique des deux premiers axes factoriels se retrouve dans le cercle des corrélations. L'axe 1 oppose à gauche les zones éloignées de structures de manière générale aux zones proches de structures. L'axe 2 est caractérisé en haut par la proximité au jardin. A l'inverse le bas de l'axe est caractérisé par les structures bâties. Toutefois, la proximité au bâtiment 1 semble très peu liée au premier plan factoriel. Cette caractéristique peut être due à la présence d'une flore particulière sur ce bâtiment mais peut aussi être liée à la nature des données. Ce bâtiment est beaucoup plus petit que le bâtiment 2. Il a fait l'objet d'un nombre beaucoup plus faible de relevés. Il a donc une place plus effacée dans l'analyse. Cette dominance du bâtiment 2 peut être perçue à travers la variable de localisation X. L'axe 2 est légèrement corrélé à cette variable. Les structures bâties sont donc plus concentrées à l'est et les structures agraires à l'ouest. Le bâtiment 1 se retrouve ainsi en quelque sorte comme un îlot dans l'espace agraire. La variable de localisation Y est pour sa part assez bien corrélée avec le premier facteur. Les

zones vierges de structures sont majoritairement réparties dans la partie nord de la parcelle (Y élevé). Il y a un gradient spatial archéologique. Celui-ci peut malheureusement être superposé à d'autres gradients spatiaux brouillant l'analyse. La corrélation de Y avec le facteur 1 est toutefois plus faible que la liaison des variables de proximités aux structures avec cet axe. Ce gradient spatial sur l'axe 1 peut donc être négligé. Après l'analyse de la structuration spatiale, il est possible d'analyser le lien entre structures et végétation.

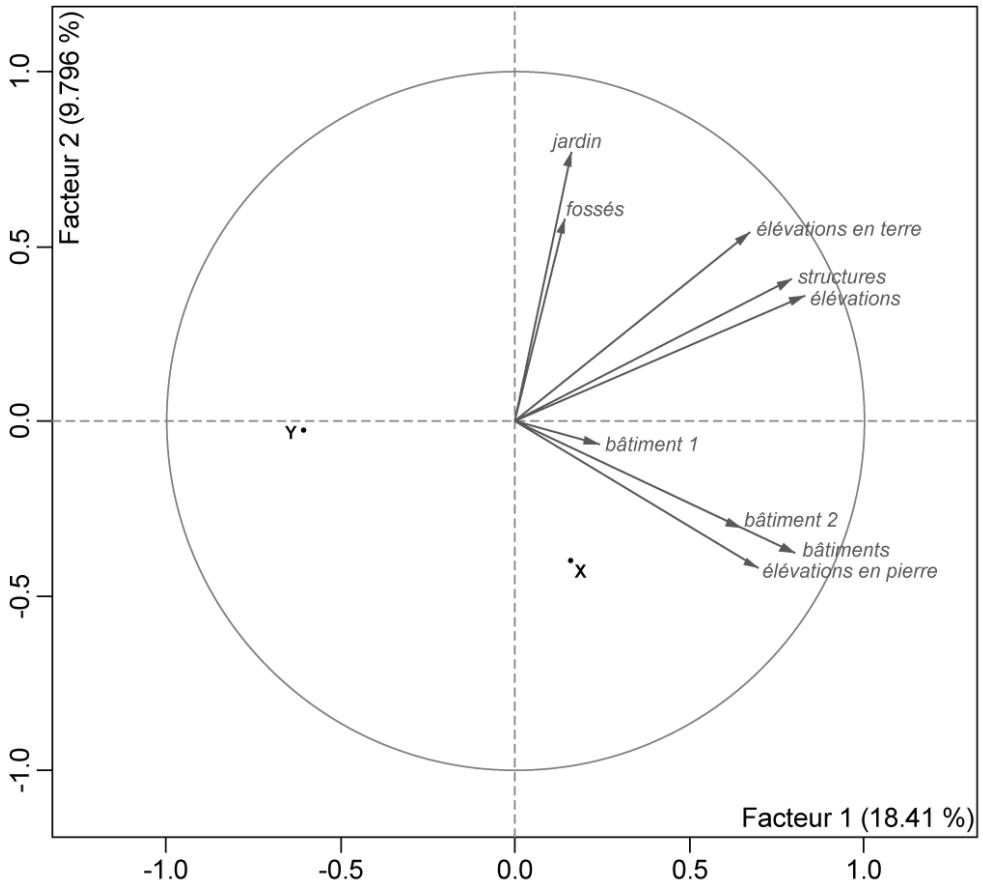


Figure 55 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des proximités aux différents types de structures et des coordonnées spatiales xy

7.2.1.6 Interprétation des axes de l'AFM en termes de composition floristique

L'analyse du rapport entre structures et végétation passe par la superposition sur le cercle des corrélations des variables de proximités aux structures avec les variables d'abondance/dominance des espèces (fig. 56).

L'axe 1 apparaît très corrélé à la fougère aigle *Pteridium aquilinum*. Cette espèce est liée principalement aux structures bâties. D'autres espèces poussent aussi de manière préférentielle sur les bâtiments : la houlque molle *Holcus mollis*, le lierre *Hedera helix*, la myrtille *Vaccinium myrtillus*, le chèvrefeuille *Lonicera periclymenum*, la jonquille *Narcissus pseudonarcissus*, et la digitale *Digitalis purpurea.* A l'opposé sur le graphique, se retrouvent les espèces poussant à distance de ces bâtiments. Ces espèces sont la potentille *Potentilla erecta*, la violette *Viola lactea*, la polygale *Polygala serpyllifolia*, le cirse *Cirsium tuberosum*

et l'ajonc *Ulex europaeus*.

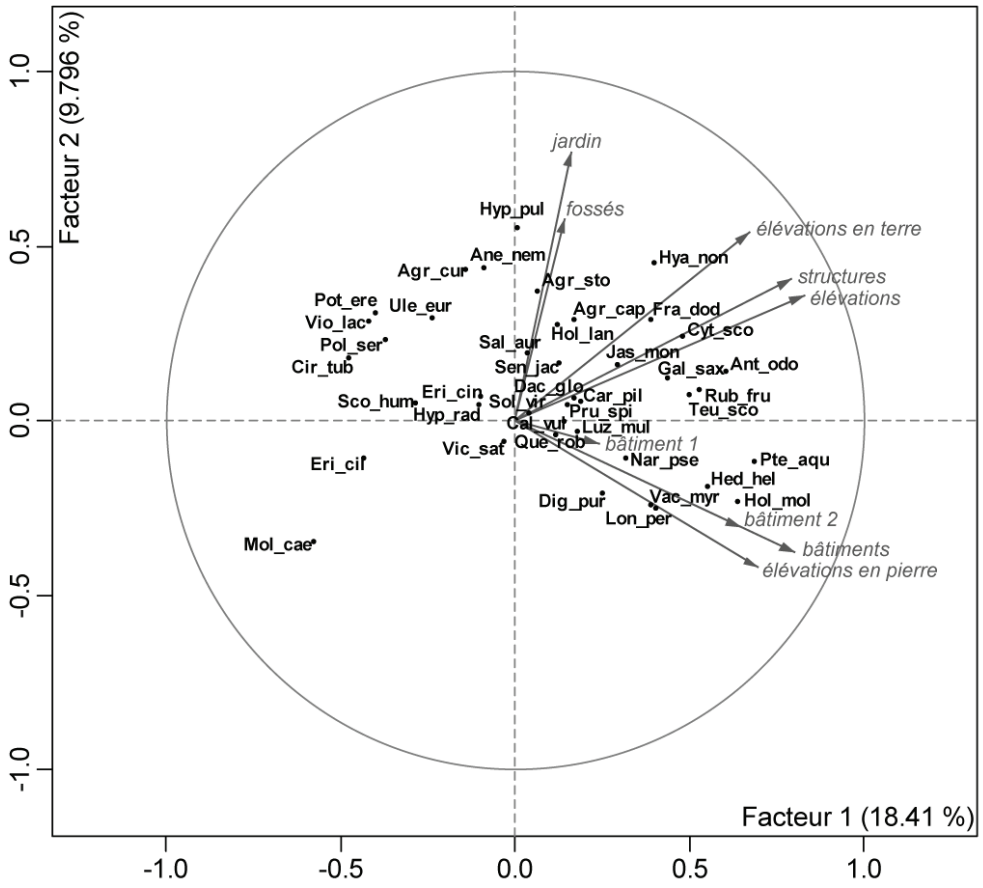


Figure 56 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des proximités aux différents types de structures et des abondances des espèces (*les codes utilisés pour les espèces sont ceux de l'annexe 6*)

L'espèce la mieux corrélée avec l'axe 2 est le millepertuis *Hypericum pulchrum*. Cette corrélation reste toutefois moyennement élevée. Cette espèce semble assez liée au jardin et aux fossés. C'est le cas d'autres espèces comme l'anémone *Anemone nemorosa*, la houlque laineuse *Holcus lanatus* et les agrostides *Agrostis capillaris*, *Agrostis curtisii*, *Agrostis stolonifera*. Le graphique montre qu'il n'existe pas d'espèces spécifiques des zones à distance de ces structures.

Les structures de manière générale sont caractérisées par tout un groupe d'espèces. Parmi ces espèces, on distingue des espèces ayant une légère préférence pour les structures agraires comme la jacinthe *Hyacinthoides non-scripta*, le genêt *Cytisus scoparius*, la bourdaine *Frangula dodonei* subsp. *dodonei* et la jasione *Jasione montana*. D'autres espèces affectionnent plus la proximité de bâtiments comme la flouve *Anthoxanthum odoratum*, le gaillet *Galium saxatile*, la ronce *Rubus fruticosus* et la germandrée *Teucrium scorodonia*. A l'opposé, deux espèces sont nettement situées à distance de toute structures : la molinie *Molinia caerulea* et la bruyère ciliée *Erica ciliaris*.

Les autres espèces ne semblent pas avoir un lien particulier avec la typologie des structures.

7.2.1.7 Comportement de la fougère aigle vis à vis des structures

La fougère aigle est donc comme on l'a vu l'espèce la plus liée à l'axe 1. Dans le cas particulier de cette espèce, des données biométriques sont disponibles. Il est possible de projeter ces variables sur le cercle des corrélations de l'AFM (fig. 57).

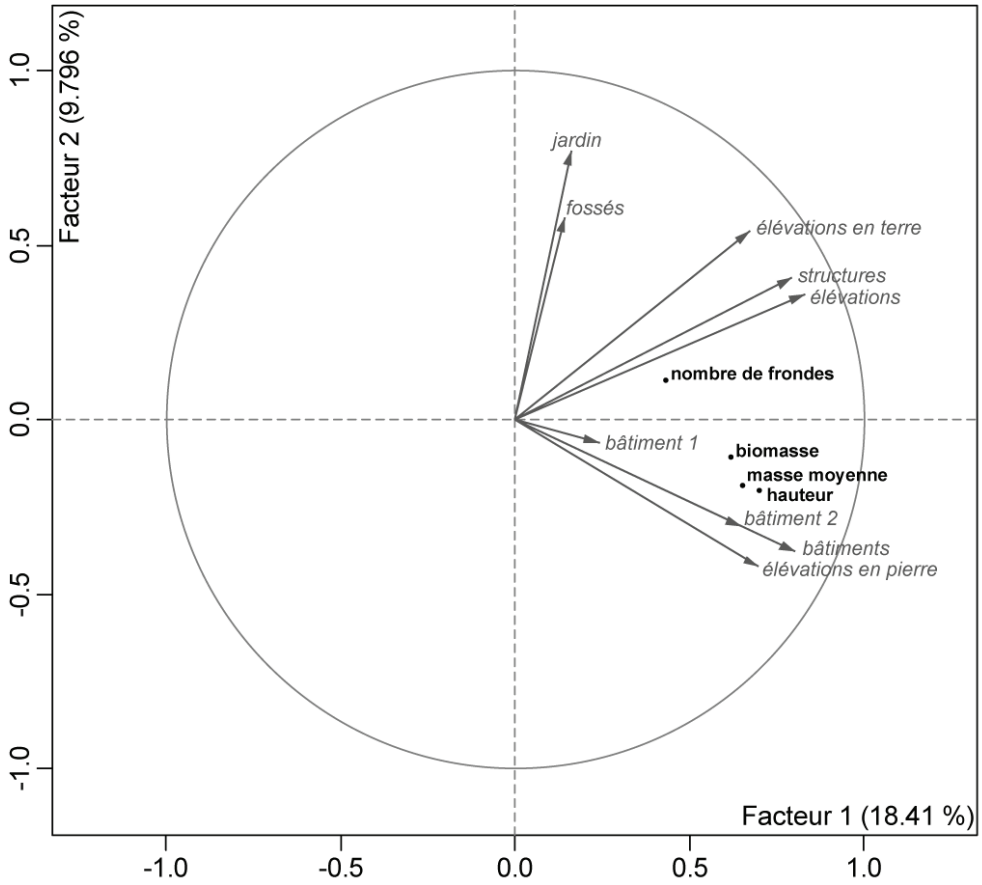


Figure 57 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des proximités aux différents types de structures et des variabbles biométriques de la fougère aigle

Il apparaît nettement une différence de comportement vis à vis de la typologie des structures entre le nombre de frondes et les autres variables biométriques. La hauteur, la biomasse totale et la masse moyenne d'une fronde sont très corrélées. Ces paramètres sont essentiellement majorés à proximité des structures bâties. Le lien avec ces structures semble assez fort. En revanche, le nombre de frondes de fougère est plus lié à la présence de structures de manière générale. Cette liaison est moins nette.

7.2.1.8 Comportement de la biodiversité vis à vis des structures

Il est aussi possible d'aborder les relevés de manière globale en projetant les variables de biodiversité des relevés sur le cercle des corrélations (fig. 58).

Cette figure montre que sur le site du Goënidou, la biodiversité est plus élevée à proximité des structures et notamment sur les anciennes structures agraires. La richesse spécifique des relevés semble plus élevée sur les fossés. Les indices de diversité de Shannon et d'équitabilité de Pielou sont plus forts au niveau des élévations en terre.

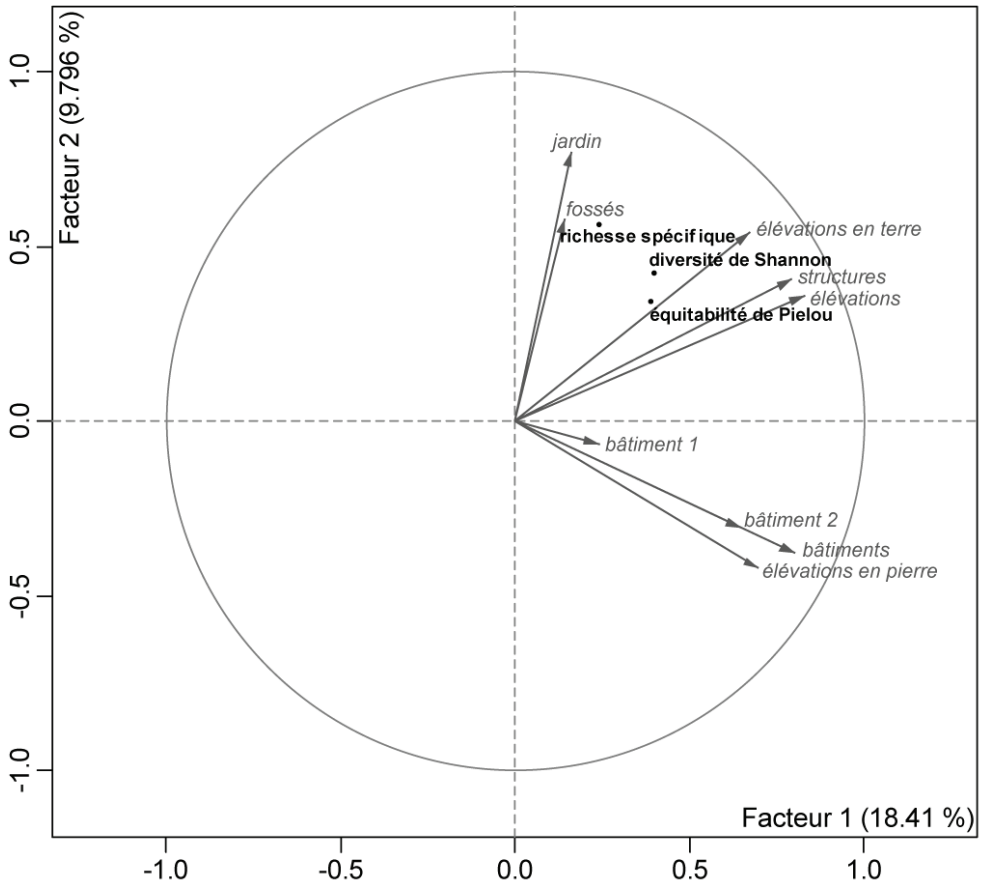


Figure 58 : AFM du Goënidou - représentation sur le plan factoriel 1-2 des proximités aux différents types de structures et des variables de biodiversité

7.2.2 Discussion

7.2.2.1 Comportement général de la flore vis à vis des structures

- ***Présence d'un lien fort entre flore et structures archéologiques***

La première information qui ressort de ces résultats est l'existence de corrélations entre les structures archéologiques et la végétation actuelle sur le site du Goënidou. L'AFM permet de mettre en évidence ces liens sur deux axes factoriels (tab. 5). La liaison générale entre la typologie archéologique et l'abondance des espèces peut être analysée (fig. 53). Ce lien est très net sur les deux premiers axes en particulier sur l'axe 1. L'AFM est donc un outil robuste pour faire ressortir les liens existants entre structures archéologiques et végétation actuelle. Ces deux axes représentent presque 30% de l'ensemble de l'information contenue dans la typologie des structures et l'abondance des espèces.

- ***Différences notables de la flore en fonction de la présence de structures***

Le premier facteur de l'AFM structure les relevés en fonction de la présence/absence de structure (fig. 54). Or cet axe 1de l'AFM, très lié à la typologie archéologique, est aussi très corrélé au premier axe factoriel de l'analyse séparée de la flore (fig. 52). Ce premier axe explique 18,41% de l'inertie totale (tab. 5). Cela peut paraître minime. Cependant, la flore est très riche en informations (tab. 4). Les différences de flore ne peuvent être résumées par un

facteur unique. Ce facteur est nettement supérieur aux autres axes explicatifs de la flore. C'est lui qui explique le mieux les différences de flore observée. Il permet d'affirmer que la présence/absence de structures est le facteur principal de variation de la flore sur ce site. Il y a des différences notables de flore entre les relevés hors structures et les relevés sur structures archéologiques.

- ***Différences notables de la flore entre aires d'activité***

L'analyse conjointe des deux premiers axes factoriels montre que l'AFM permet de structurer de manière quasiment parfaite les relevés en termes d'anciennes aires d'activité (fig. 54). Le deuxième axe permet d'isoler les relevés sur structures agraires. Or ce deuxième axe est assez bien corrélé au deuxième axe explicatif de la flore (fig. 52). La distinction entre structures agraires et bâties est en partie le deuxième facteur structural principal de la flore. Il y a donc des différences de végétation en fonction du type d'activité passé. Les zones d'activité diffuse, d'activité agraire et d'activité domestique sont chacune caractérisées par une végétation particulière.

- ***Pas de différences notables de la flore entre structures différentes au sein d'une même aire d'activité***

L'AFM ne permet pas de distinguer de différences de flore en fonction des structures au sein d'une même aire d'activité (fig. 54). La flore des bâtiments de manière générale est similaire. De la même manière, entre structures agraires, l'AFM ne permet pas de discerner de différences de flore. Toutefois, les talus semblent héberger une végétation intermédiaire, caractéristique des structures de manière générale. Cette absence de différences peut être liée au protocole d'analyse. Les différentes structures ne sont pas indépendantes les unes des autres. Dans la table des données de typologie, les structures d'un même type d'activité sont regroupées. La typologie est imbriquée. Cette imbrication peut expliquer le mauvais discernement des structures par l'AFM. Les structures sont aussi organisées spatialement (fig. 55). Les fossés par exemple sont presque toujours associés à des talus. A l'échelle à laquelle l'étude a été effectuée, les relevés couvrent souvent ces deux types de structures. L'analyse ne permet pas de les discerner. L'analyse des cartes des espèces montre que les grandes différences de flore sont liées aux aires d'activité (macrostructures) (annexe 4). Il n'y a pas d'espèces caractéristiques d'un type de structure particulière. Même si la nature des données joue un rôle, cette absence de différence de flore entre structures au sein d'une même aire d'activité semble au final refléter une réalité biologique.

7.2.2.2 Comportement de la fougère aigle vis à vis des structures

L'analyse peut aussi être faite en termes d'espèces.

La dynamique de la fougère aigle a été évaluée à l'aide de mesures biométriques. Celle-ci répond particulièrement bien à la présence de structures (fig. 57). Elle est fortement représentée au niveau des bâtiments. Elle y a une biomasse supérieure. La hauteur des frondes et leur masse moyenne sont aussi accrues sur bâtiments. Le nombre de frondes, quant à lui, est supérieur au niveau des structures de manière générale. Cette différence de comportement

peut être liée à des stratégies écologiques. La vigueur des frondes est supérieure sur bâtiments. C'est ce milieu qu'elle affectionne particulièrement. Le plus fort nombre de frondes sur les structures de manière générale serait plus lié à des phénomènes de compétition avec d'autres espèces. La fougère est caractérisée par une forte compétitivité. Son expansion par reproduction végétative (rhizome) n'est en général pas gênée par les espèces herbacées (Marrs & Watt, 2006). Seule l'étude des espèces dominantes de la strate herbacée peut renseigner sur ces différences de comportement.

7.2.2.3 Comportement des espèces dominantes de la strate herbacée vis à vis des structures

La strate herbacée est dominée par deux espèces assez bien corrélées aux structures : la molinie *Molinia caerulea* et la houlque molle *Holcus mollis* (fig. 56). La molinie fuit clairement les structures. La houlque molle, pour sa part, affectionne particulièrement les bâtiments. Les différences de flore peuvent être liées aux structures elles-mêmes mais aussi à la fougère. La fougère, de par sa taille élevée, crée de l'ombre au niveau des bâtiments. La houlque peut affectionner cette ombre et pousser sous la fougère. Les espèces sont fréquemment associées (Ovington & Scurfield, 1956). De son côté, la molinie fuit les structures en général. Elle n'est donc *a priori* pas influencée par l'ombre de la fougère sur les bâtiments. La molinie pousse sous forme de mottes denses (touradons). Ces formations peuvent gêner le développement des autres espèces (Taylor *et al.*, 2001). Elle est une des seules espèces compétitrices de la fougère (Marrs & Watt, 2006), ce qui peut expliquer en particulier la réduction du nombre de frondes. Sa place sur l'AFM est en effet à l'opposé de cette variable (fig. 56 et 57). Cette espèce ralentit ainsi sûrement l'extension des frondes de fougère dans certaines zones même si l'habitat des deux espèces est globalement différent.

7.2.2.4 Comportement des espèces accompagnatrices de la strate herbacée vis à vis des structures

Les autres espèces ont aussi une répartition nettement corrélée à la présence de structures (fig. 56). Ces différences de flore au niveau des occupations peuvent être directement liées à la présence de structures mais aussi indirectement à travers la répartition des espèces dominantes. Des phénomènes de compétition interspécifiques peuvent exister.

- ***Présence d'un gradient d'activité diffuse/activité agraire/activité domestique***

Le nuage des espèces sur le cercle des corrélations de l'AFM a une forme particulière (fig. 56). Il est arqué en « banane ». Ce type de forme en analyses multivariées est généralement caractéristique des gradients. Les taxons s'organisent suivant un gradient allant des zones d'activité diffuse, aux zones d'activité domestique en passant par les zones d'activité agraire. Des stades intermédiaires sont visibles. Il est possible d'observer des espèces communes aux zones d'activités diffuse et agraire. Elles fuient les relevés avec activité domestique. De la même manière certaines tolèrent à la fois les zones d'activité agraire et domestique. Elles fuient les zones d'activité diffuse. En revanche, étant en présence

d'un gradient, aucune espèce ne fuit les activités agraires.

- ***Espèces caractéristiques des zones d'activité diffuse***

Les zones d'activité diffuse sont caractérisées par peu d'espèces. Outre la molinie, seule la bruyère ciliée *Erica ciliaris* semble affectionner un tel milieu. Elles indiquent la présence de structures de manière générale par leur absence ou une abondance plus faible. La molinie est peut être trop compétititive pour la plupart des autres taxons.

- ***Espèces caractéristiques des zones d'activités diffuse et agraire***

La plupart des espèces poussant dans les zones d'activité diffuse tolèrent les zones agraires. Les plus caractéristiques sont la potentille *Potentilla erecta*, la violette *Viola lactea*, la polygale *Polygala serpyllifolia*, le cirse *Cirsium tuberosum* et l'ajonc *Ulex europaeus*. Elles fuient les bâtiments. Ce phénomène peut être dû à la présence des bâtiments eux-même mais peut aussi être lié à la dynamique accrue de la fougère aigle sur ces derniers. En effet, elle est fortement compétitrice. En faisant de l'ombre, elle exclue les espèces qui sont les plus héliophiles. Sa litière épaisse limite le développement de certains taxons. Enfin, elle produit des phytotoxines qui empêchent le développement de nombreuses plantes (Marrs & Watt, 2006).

- ***Espèces caractéristiques des zones d'activité agraire***

Peu d'espèces semblent totalement inféodées aux zones agraires. La plupart sont légèrement tolérantes à une des deux autres aires d'activité. Les plus caractéristiques sont le millepertuis *Hypericum pulchrum,* l'anémone *Anemone nemorosa*, la houlque laineuse *Holcus lanatus* et les agrostides *Agrostis capillaris*, *Agrostis curtisii*, *Agrostis stolonifera*.

- ***Espèces caractéristiques des zones d'activités agraire et domestique***

Un certain nombre d'espèces fuient les zones d'activité diffuse. Elles poussent donc sur les structures de manière générale qu'elles soient agraires ou domestiques. Les plus marquées sont la jacinthe *Hyacinthoides non-scripta*, le genêt *Cytisus scoparius*, la bourdaine *Frangula dodonei* subsp. *dodonei*, la jasione *Jasione montana*, la flouve *Anthoxanthum odoratum*, le gaillet *Galium saxatile*, la ronce *Rubus fruticosus* et la germandrée *Teucrium scorodonia*. Leur abondance plus forte sur les structures en général peut être liée à la présence de ces dernières mais aussi à l'absence de la molinie. En effet, la molinie est très compétitive. Ses touradons occupent souvent la totalité de l'espace et ne laissent que peu de place aux autres espèces (Taylor *et al.*, 2001).

- ***Espèces caractéristiques des zones d'activité domestique***

Enfin, un certain nombre d'espèces sont caractéristiques des zones domestiques. Ces espèces sont le lierre *Hedera helix*, la myrtille *Vaccinium myrtillus*, le chèvrefeuille *Lonicera periclymenum*, la jonquille *Narcissus pseudonarcissus*, et la digitale *Digitalis purpurea*. Elles sont favorisées par la présence des bâtiments. Elles peuvent aussi être favorisées par la présence de la fougère. La fougère, en créant de l'ombre, peut permettre à des espèces plus

ombrophiles d'être favorisées.

- ***Augmentation de la biodiversité au niveau des zones agraires***

Enfin, il est possible d'observer une plus forte richesse spécifique des zones agraires (fig. 58). Les indices de biodiversité de Shannon et d'équitabilité de Pielou sont aussi plus élevés au niveau de cette zone d'activité et des structures de manière générale. Il y a augmentation de la biodiversité sur les structures et en particulier sur les structures agraires. Ceci peut être expliqué par l'absence relative d'espèces dominantes sur les zones d'activité agraire (fig. 56). La molinie et la houlque molle ne s'y expriment pas pleinement. La fougère n'y est pas non plus hyper-dominante (fig. 57). Tous les taxons ayant tendance à fuir ces plantes trouvent un habitat favorable sur structures agraires. La richesse spécifique y est donc accrue. L'absence d'espèces dominantes entraîne une plus grande diversité végétale. Les indices de biodiversité de Shannon et d'équitabilité de Pielou sont plus élevés.

Ces observations vont dans le sens de la théorie de J.H. Connel (Connel, 1978) sur l'augmentation de la biodiversité lors de perturbations intermédaires (Cf. 3.2.3.1.1). Les zones d'activité agraires représentent un stade intermédaire. Les activités humaines y ont été moins fortes que dans les zones bâties, mais plus importantes que dans les zones vierges de vestiges. Le gradient végétal observé pourrait ainsi être un gradient de perturbation.

7.3 Réponse de l'ensemble de la flore vasculaire à l'échelle des structures (site de Kervédan)

7.3.1 Résultats

7.3.1.1 Résultats des sondages

- ***Sondage I (fig. 59)***

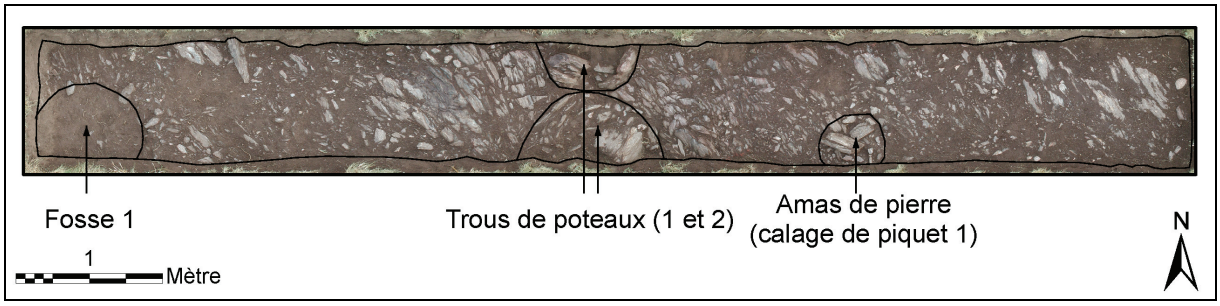


Figure 59 - Interprétation archéologique de l'orthophotographie verticale du sondage I de Kervédan en fin de fouille

Au niveau du sondage I, une fosse (fosse 1) située à l'ouest en limites de fouilles a été trouvée sous une tache de végétation plus dense. Au centre, deux gros trous de poteaux (trous de poteaux 1 et 2) accolés avec pierres de calage ont pu être mis au jour sous une autre de ces taches de nature végétale différente. Un peu plus à l'est, un amas de quelques pierres indique un éventuel calage de piquet (calage de piquet 1 ?).

- ***Sondage II (fig. 60)***

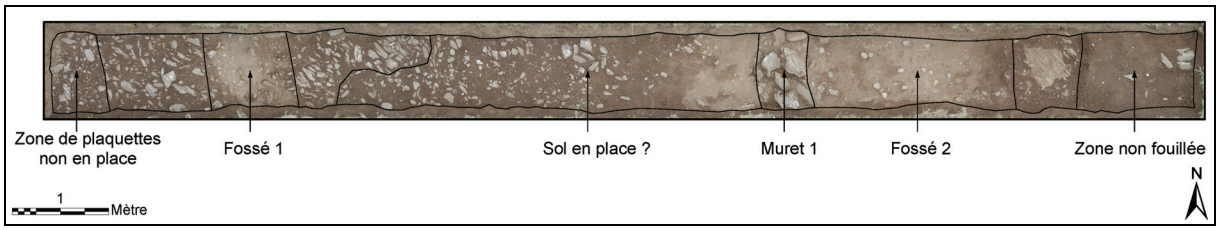


Figure 60 - Interprétation archéologique de l'orthophotographie verticale du sondage II de Kervédan en fin de fouille

Dans la partie ouest du décapage, le sommet d'une structure en creux est apparu. Celle-ci correspond sûrement à un fossé (fossé 1) au vu des données de végétation et de géophysique dessinant une structure linéaire. Au centre, le reste d'un ancien mur ou muret est apparu (mur 1). Il est longé dans sa partie est par un deuxième fossé (fossé 2). Au niveau des deux fossés avait été observée une végétation caractéristique, notamment la houlque *Holcus lanatus* et la carotte *Daucus Carota*.

- ***Sondage III (fig. 61)***

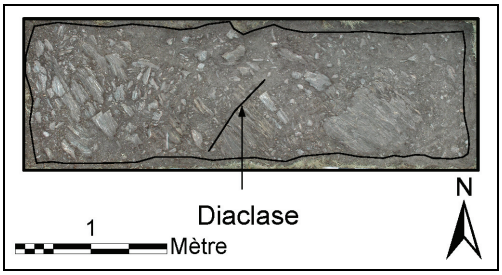


Figure 61 - Interprétation archéologique de l'orthophotographie verticale du sondage III de Kervédan en fin de fouille

Aucune structure n'est apparue au niveau du sondage III. Il est à signaler que la tache de Lotier (*Lotus corniculatus*) qui avait orienté son implantation semble devoir sa présence à une diaclase du micaschiste. En effet, les racines du pied sont apparues directement implantées dans la diaclase.

- ***Sondage IV (fig. 62)***

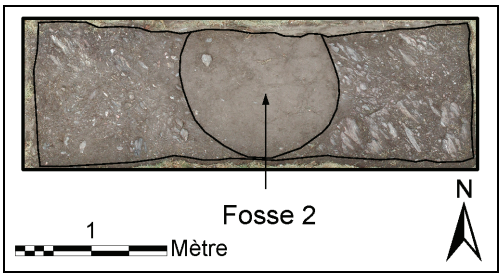


Figure 62 - Interprétation archéologique de l'orthophotographie verticale du sondage IV de Kervédan en fin de fouille

Sous la tache de végétation à l'origine du sondage IV est apparue une fosse d'environ un mètre de diamètre (Fosse 2).

- ***Sondage V (fig. 63)***

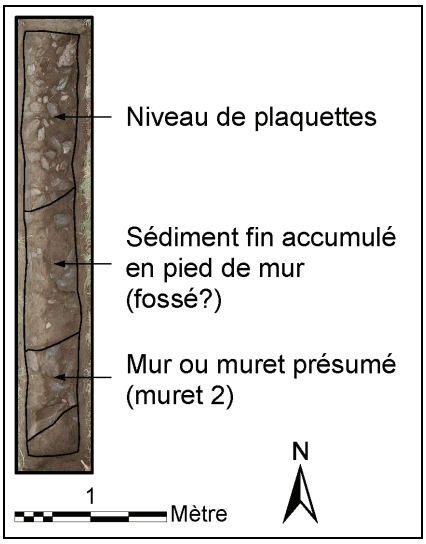


Figure 63 - Interprétation archéologique de l'orthophotographie verticale du sondage V de Kervédan en fin de fouille

Dans la partie sud du sondage V un muret (muret 2) est pressenti. La largeur du sondage étant trop réduite (50 cm), il n'est pas possible de l'affirmer. Il semble que la nature différente de la végétation à ce niveau soit due à un effet de rétention d'éléments fins dans la pente par ce muret potentiel ou peut-être à la présence sous-jacente d'un fossé comme tendrait à le confirmer la géophysique (fossé 3).

- ***Remarques générales***

A la fouille, seuls trois petits tessons et quelques éléments de clayonnage ont été trouvés. Ceci n'est pas étonnant car les sondages sont non intrusifs. En revanche, un certain nombre de galets et fragments de galets ont pu être trouvés. La majorité sont en quartz. La proportion de fragments est assez importante. L'étude sommaire de ces fragments montre qu'ils ne sont pas cassés accidentellement. Ils sont le produit d'une percussion sur enclume. Aucun de ces fragments ne présente de retouche. Il est donc difficile de statuer sur le but de ce débitage. Certains galets sont entiers et proviennent peut-être d'un ancien niveau de sol aménagé. Ils semblent organisés sur un même plan horizontal notamment dans la partie est du sondage II au-dessus du fossé 2.

7.3.1.2 Analyse rapide de la végétation du système de rempart

Les structures archéologiques du système de remparts de l'éperon sont globalement connues grâce aux sondages réalisés par L.M. Threipland (Threipland, 1942). Les deux systèmes de fossé/talus extrêmes sont encore clairement visibles. Les fossés et talus intermédiaires sont encore discernables en micro-topographie. L'analyse porte sur ces derniers. La flore révèle très bien les limites des fossés par rapport aux talus. Ces différences sont assez visibles au sol (fig. 64).

Du haut du talus intérieur, il est possible d'avoir une vue globale sur l'ensemble du système de remparts. De ce point de vue, l'ensemble du système défensif composé d'une

alternance de talus et de fossés est clairement visible dans la végétation (fig. 65).

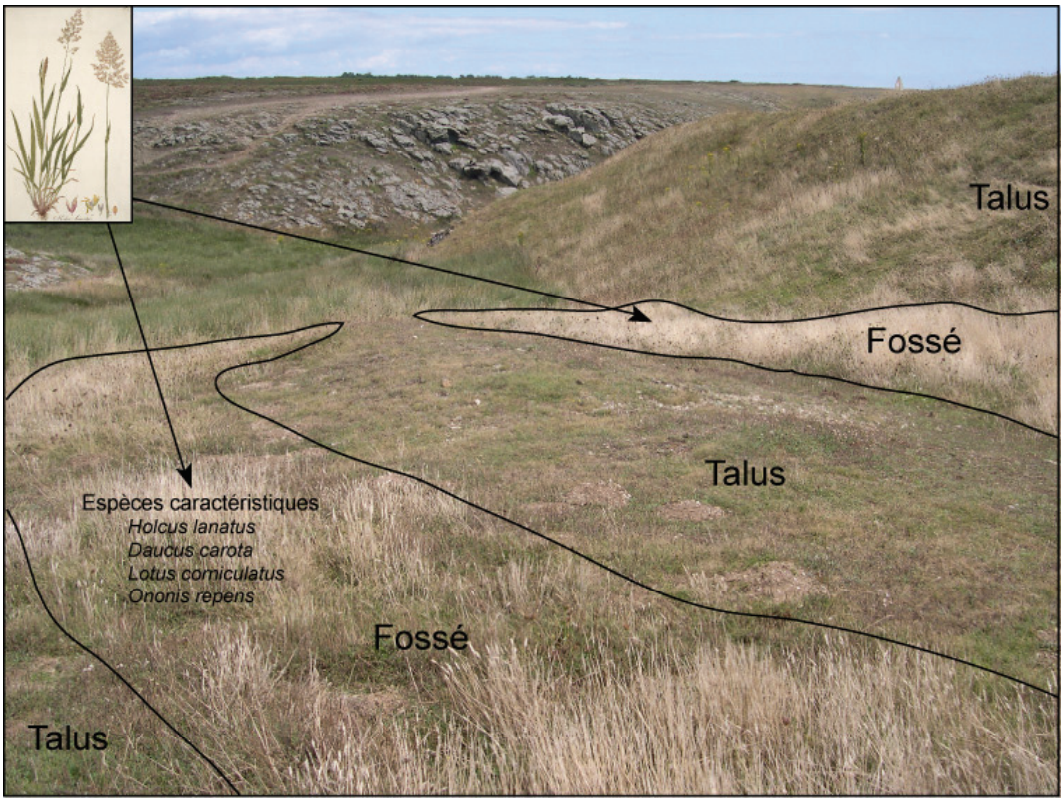


Figure 64 - Anomalies à *Holcus lanatus* visibles au niveau des fossés du système de remparts de l'éperon barré de Kervédan (vue du sol)

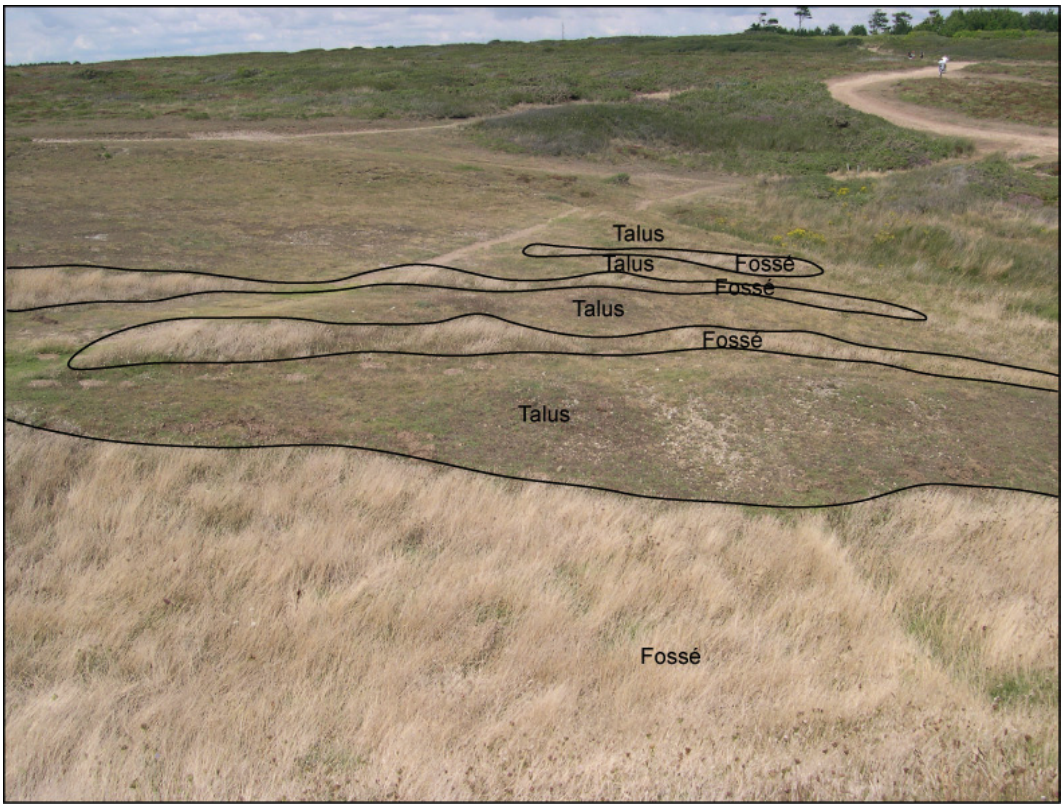


Figure 65 - Anomalies à *Holcus lanatus* visibles au niveau des fossés du système de remparts de l'éperon barré de Kervédan (vue du haut du rempart intérieur)

Sur les talus, la flore est à peu près la même que sur le reste de l'éperon. Les espèces caractéristiques sont le plantain corne de cerf (*Plantago coronopus*) et le brome (*Bromus hordeaceus* subsp. *ferronii*). La proportion de sol à nu est assez importante.

Sur les fossés, l'espèce la plus caractéristique est la houlque laineuse (*Holcus lanatus*). Absente des talus, elle est l'espèce dominante des fossés. Cette différence marquée de comportement est à l'origine des différences visuelles permettant d'identifier les fossés et les talus. Cette différence est d'autant plus accentuée lorsque la houlque est en période de floraison ou de fructification. D'autres espèces accompagnent la houlque sur les fossés comme la carotte sauvage (*Daucus carota*), le lotier (*Lotus corniculata*), la bugrane (*Ononis repens*) voire occasionnellement la betterave (*Beta maritima*).

7.3.1.3 Analyse fine de *Daucus carotta* au niveau du sondage I

Au niveau du sondage I, l'orthophotographie avant fouille a été interprétée. La maille d'interprétation est une maille carrée de 6.25 centimètres (1/16 de mètre) de coté. Cette interprétation a été réalisée à l'échelle 1/1. Pour chaque maille, la présence de la carotte (*Daucus carota*) a été notée. La carte résultante n'indique pas la présence absolue de *Daucus carota* mais sa présence ressentie à l'échelle d'étude sur orthophotographie. Ainsi lorsque seul un pied de très faible taille est présent et est masqué par le reste de la végétation, les mailles considérées notent l'absence visuelle de l'espèce.

La carte résultant de cette étude montre que *Daucus carota* est répartie en deux zones : l'extrémité ouest et le centre du sondage. Ces deux zones correspondent aux zones de structures en creux mises au jour par la fouille. Dans la partie ouest a été trouvée la fosse 2 et au centre du sondage ont été découverts les deux trous de poteaux 1 et 2 accolés. La juxtaposition entre les cartes de présence/absence de la carotte et de présence/absence de structures en creux n'est pas parfaite. Il semble clair toutefois qu'il existe un lien fort à cette échelle.

Pour voir si l'échelle d'étude joue un rôle dans la détection du lien entre structures et végétation, la même étude a été réalisée pour des mailles plus lâches (fig. 66).

Pour changer d'échelle d'étude, il a suffi d'agréger les données existantes dans la nouvelle maille moins détaillée. Lors de cette opération, pour chaque nouvelle maille, il est possible soit de recoder l'information en présence/absence de *Daucus carota* soit en pourcentage de mailles initiales avec présence de l'espèce (récurrence). Cette agrégation a été réalisée pour des mailles carrées de 12.5 centimètres (1/8 de mètre), de 25 centimètres (1/4 de mètre), de 50 centimètres (1/2 de mètre) et de 1 mètre de coté. Le nombre de mailles initiales retrouvées ainsi agrégées dans chaque nouvelle maille est respectivement de 4, 16 (4^2), 64(4^3), 256(4^4) pour chacune des mailles précédemment citées.

L'observation des cartes ainsi créées montre que malgré la perte de données due à l'agrégation, le lien entre structures et *Daucus carota* reste nettement visible. Ce lien semble plus visible en termes de récurrence qu'en présence/absence. En présence/absence, la surface de relevés où *Daucus carota* est présente augmente avec l'agrégation. Ceci se traduit par un moins bon discernement du lien avec les structures. Avec une maille plus grande, il n'aurait plus été possible de voir de corrélation. Pour les mailles de 0.5 et 1 mètre de coté, il est déjà

plus compliqué de percevoir les correspondances. Cela est plus aisé en termes de récurrence. Les mailles sans structures ont une récurrence plus faible de la carotte par rapport aux mailles avec structures. Pour les mailles de 0.25 et 0.5 mètres de coté, le rapport semble même plus visible que pour les mailles inférieures du fait de ce lissage. En effet, certains îlots de mailles sans carotte au sein d'un environnement où cette espèce est globalement présente se retrouvent gommés. L'inverse est bien entendu aussi valable. Pour la maille de 1 mètre carré, la relation avec les structures commence à s'estomper.

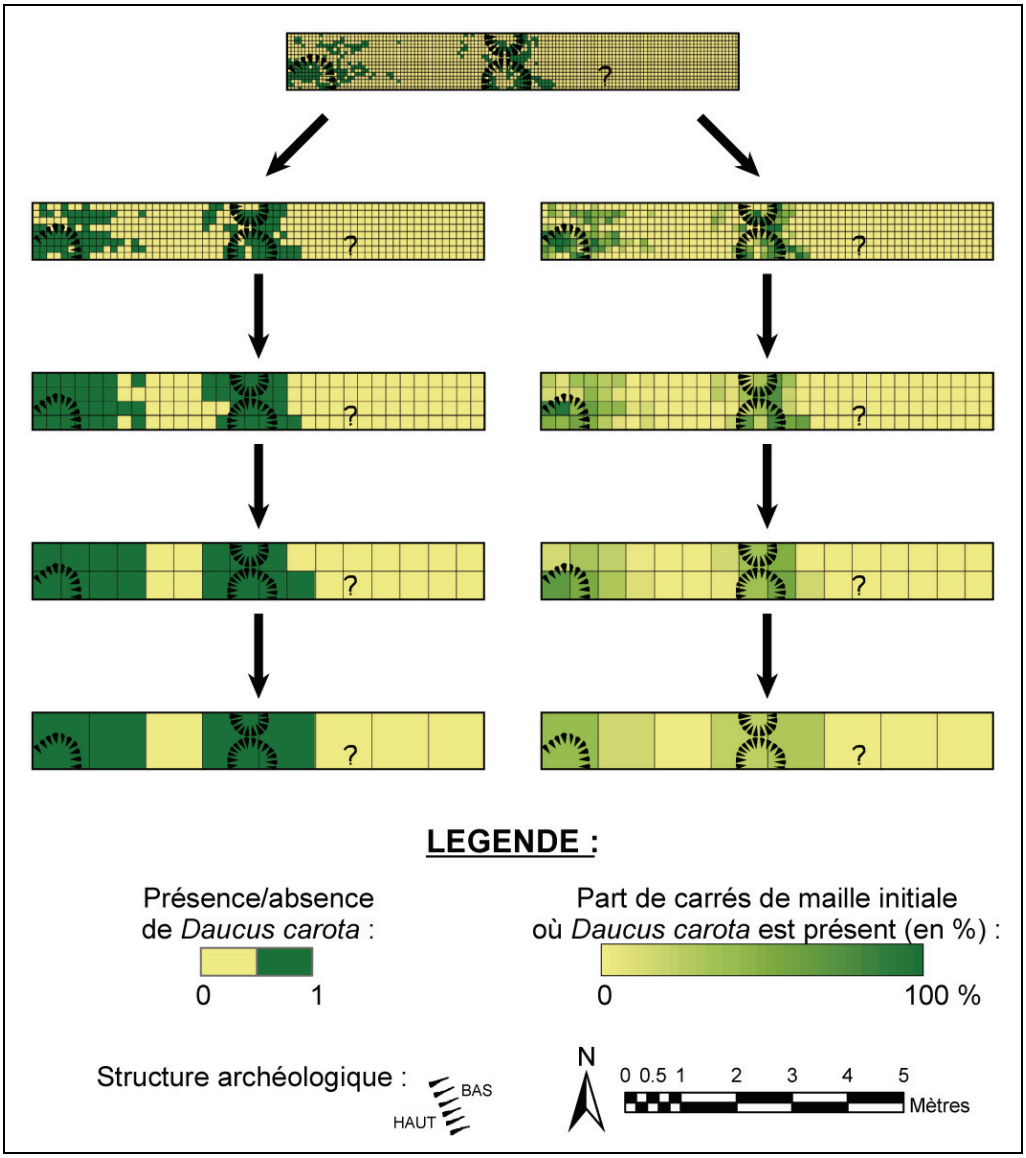


Figure 66 - Effet de l'échelle d'étude sur la perception des relations spatiales entre la présence ou la récurrence de *Daucus carota* L. et les structures archéologiques du sondage I du site de Kervédan

7.3.1.4 Analyse de la végétation sur l'ensemble des sondages

Comme sur le site du Goënidou, l'ensemble des espèces vasculaires a été étudié. Des cartes d'abondance ont été élaborées pour chaque espèce (annexe 7). La biodiversité est abordée par les cartes de richesse spécifique, de diversité de Shannon et d'équitabilité de Pielou (annexe 8). L'emplacement des structures rencontrées à la fouille est annoté sur chacune de

ces cartes. Ces résultats cartographiques sont synthétisés par une AFM (Cf. 6.6.3).

7.3.1.4.1 Analyses séparées

Comme pour le site du Goënidou, l'AFM débute par l'analyse séparée des différents groupes de données. Pour le site de Kervédan, les données sont structurées en sept groupes (fig. 67).

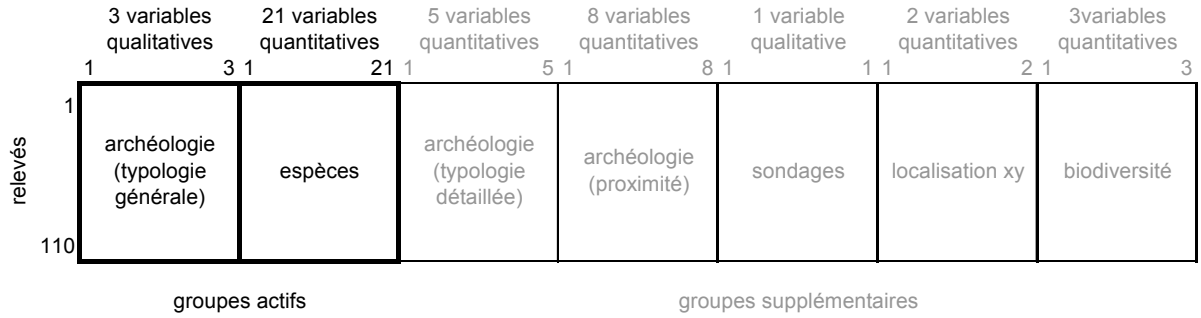


Figure 67 - AFM de Kervédan : structure des données utilisées

La mise en évidence des relations entre la typologie archéologique et les abondances/dominances des espèces implique de ne prendre que ces deux groupes de données comme groupes actifs de l'AFM. Pour ce site, la fouille a permis de caractériser assez finement les différents types de structures. Afin de ne pas avoir trop peu de relevés par type de structures, seule la typologie générale a été utilisée en groupe actif. La typologie détaillée fait l'objet d'un groupe supplémentaire. La proximité aux structures n'a pas été utilisée comme groupe actif pour les mêmes raisons que pour le site précédent. Dans le cas de ce site, toutes les espèces sont présentes dans au moins 2% des relevés. Il n'y a donc pas de groupe supplémentaire d'espèces rares. Les variables de biodiversité et de localisation xy ont aussi été implémentées comme groupes supplémentaires. La spécificité de l'étude de ce site est le découpage en sondages. Ce découpage en sondages a été pris en compte à travers un autre groupe supplémentaire. Comme pour le site précédent, les groupes de variables qualitatives sont analysés par ACP et les groupes de variables quantitatives par ACM. Le résumé des ACM et ACP des groupes actifs est consultable dans le tableau 6.

Tableau 6 - AFM de Kervédan : inerties des analyses séparées des groupes actifs

		axe 1	axe 2	axe 3	axe 4	axe 5	axe 6	axe 7	axe 8	axe 9	axe 10
Valeur propre	ACM	0.66	0.33	0.01							
	ACP	4.11	2.45	1.67	1.42	1.31	1.14	1.05	1.02	0.94	0.89
%	ACM	66.17	32.68	1.15							
	ACP	19.58	11.69	7.93	6.78	6.24	5.42	5.01	4.84	4.49	4.25
% cumulé	ACM	66.17	98.85	100.00							
	ACP	19.58	31.27	39.20	45.98	52.22	57.65	62.66	67.50	71.99	76.24

Les deux analyses sont clairement déséquilibrées. L'ACM n'a que trois variables. La quasi-totalité de l'information de la typologie est synthétisée par les deux premiers facteurs (98%). Le nombre de variables de végétation est plus élevé (21). Les premiers facteurs de l'ACP ne résument que 31% de l'information. La flore est plus riche en information que la

typologie des structures comme pour Le Goënidou. Ce déséquilibre est, comme il a été énoncé, pris en compte dans l'AFM. Il ne représente donc pas une gêne pour la suite de l'analyse.

7.3.1.4.2 Signification des axes de l'AFM

Le tableau 7 regroupe l'inertie globale de l'AFM et les inerties ventilées par groupe pour les dix premiers axes.

Tableau 7 - AFM de Kervédan : inertie des axes, globale et ventilée par groupe actif

	axe 1	axe 2	axe 3	axe 4	axe 5	axe 6	axe 7	axe 8	axe 9	axe 10
Ensemble en %	24.57	9.75	8.65	6.83	5.23	5.07	4.73	4.15	3.75	3.59
Ensemble	1.63	0.65	0.57	0.45	0.35	0.34	0.31	0.27	0.25	0.24
Groupe 1 (ACM)	0.91	0.71	0.58	0.29	0.04	0.31	0.11	0.07	0.05	0.09
Groupe 2 (ACP)	0.91	0.82	0.75	0.82	0.99	0.84	0.96	0.99	0.99	0.96

La première valeur propre de l'AFM est assez élevée. Ce premier facteur résume à lui seul presque 25% de l'information. Les valeurs propres suivantes sont nettement plus faibles et décroissent de manière régulière. Il n'est pas possible de détecter des décrochements nets entre les facteurs suivants. La décomposition des facteurs par groupe révèle que le premier facteur correspond à une inertie élevée des deux groupes. Le deuxième axe est aussi lié de manière équivalente aux deux groupes mais de manière moins forte. Le troisième facteur est aussi lié aux deux groupes mais avec une plus forte participation de la flore. Les axes suivants sont spécifiques de la flore. Les liens entre archéologie et végétation ne sont donc potentiellement étudiables que sur les trois premiers facteurs. Il a été vu précédemment que la typologie pouvait être résumée en seulement deux dimensions. L'AFM découpe donc cette information sur trois premiers axes. Il y a une redondance d'information entre les axes 2 et 3 où la contribution de la typologie est plus faible. Il est donc légitime de se limiter à l'étude du premier plan factoriel. La liaison des deux premiers facteurs de chaque groupe avec le premier plan factoriel de l'AFM peut alors être analysée (fig. 68).

Le premier facteur de l'AFM est fortement corrélé aux premiers axes de chaque analyse séparée. Les principales variations de typologie et de flore sont liées et résumées par cet axe. Le deuxième axe de l'AFM est aussi un bon résumé des deuxièmes axes de chaque analyse. Il y a donc *a priori* un lien très fort entre la flore et la typologie. Il est possible d'évaluer ce lien à travers le graphique du carré des liaisons (fig. 69).

Les espèces et la typologie générale sont effectivement très liées. Ce lien est très net sur l'axe 1 de l'AFM. Les groupes supplémentaires de typologie détaillée et de proximité aux structures ont été ajoutés sur ce graphique.

La typologie détaillée ne se comporte pas comme la typologie générale. Il n'y a pas de lien fort entre cette typologie détaillée et les espèces. Le choix d'exclure ces variables du calcul de l'analyse se révèle avoir été judicieux. Le groupe des proximités aux structures est lui aussi peu lié à la typologie générale des structures. Comme attendu, ce groupe est dans une position intermédiaire entre la typologie générale et la typologie détaillée. En effet, ces proximités ont été mesurées aux deux types de typologies.

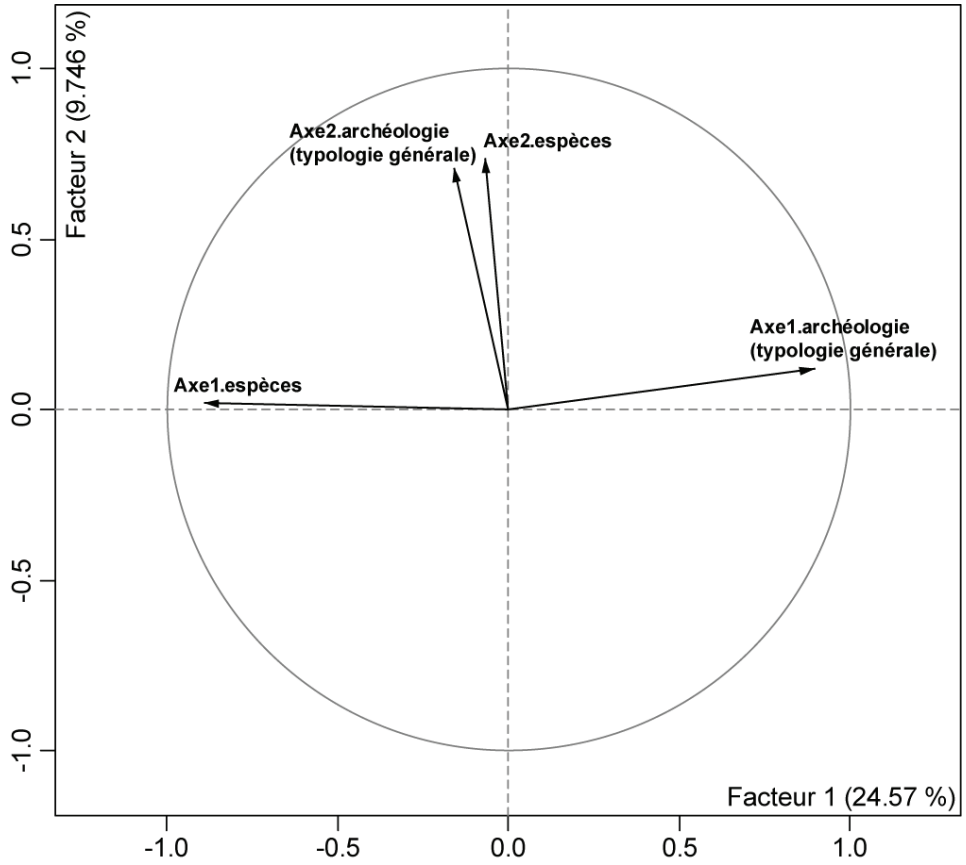


Figure 68 - AFM de Kervédan : représentation des deux premières composantes principales de chaque groupe actif par leur corrélation avec le premier plan factoriel

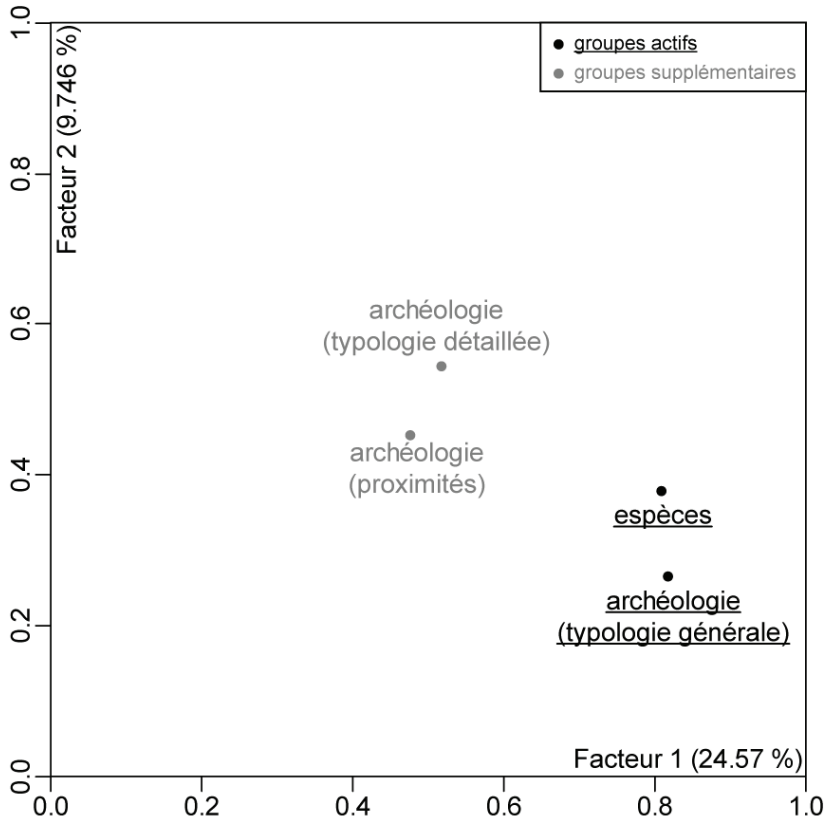


Figure 69 - AFM de Kervédan : carré des liaisons entre les groupes et le premier plan factoriel

De plus, ayant affaire à des relevés groupés en sondages, les faibles proximités aux structures ne sont pas fiables. Elles sont calculées sur des distances qui peuvent être très élevées entre un relevé et une structure présente sur un autre sondage. Elles ne reflètent pas la réalité. Il peut y avoir des structures plus proches dans les zones non fouillées. Elles ne sont qu'une image de la connaissance des structures au niveau des sondages.

Comme pour le site du Goënidou, la typologie permet d'analyser l'espace des relevés. Les proximités servent dans l'espace des variables.

7.3.1.4.3 Interprétation des axes de l'AFM en termes de typologie des structures

L'interprétation archéologique de l'AFM est effectuée à partir de la typologie visualisée dans l'espace des relevés (fig. 70).

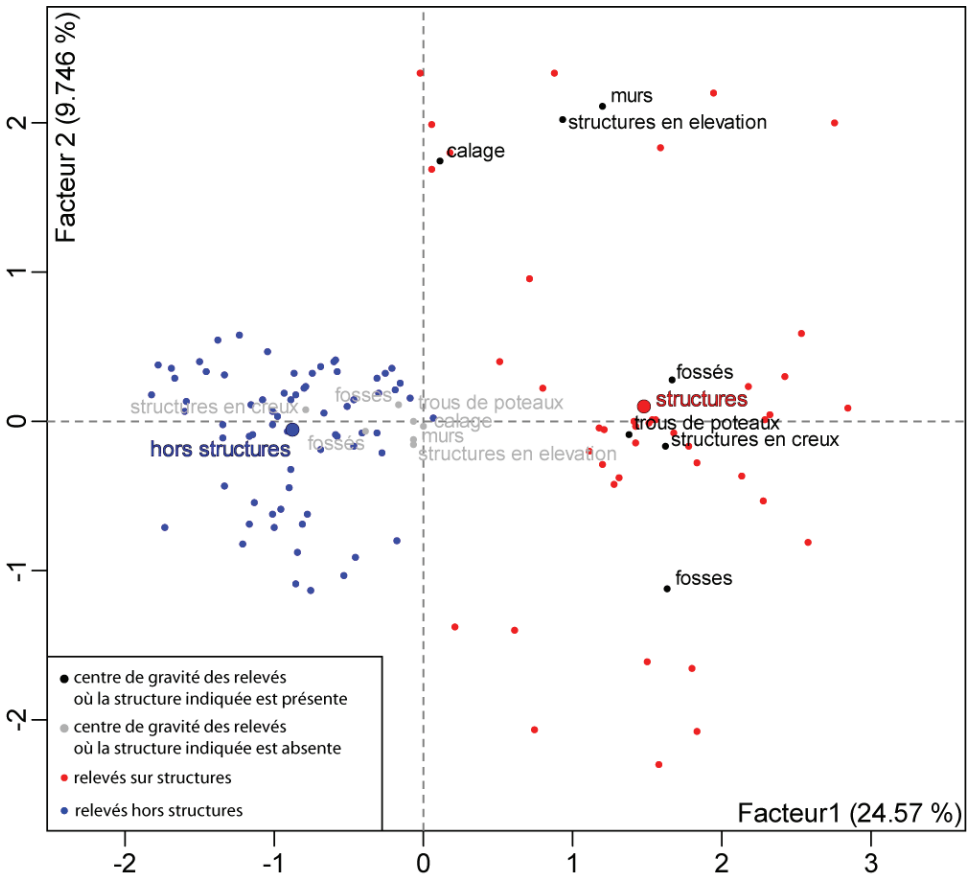


Figure 70 - AFM de Kervédan : représentation de la typologie sur le premier plan factoriel

Il apparaît dans ce graphique que l'axe 1 discrimine les relevés en fonction de la présence/absence de structures. Quasiment tous les relevés sur structures ont une valeur positive sur cet axe. A l'inverse, les relevés hors structures ont presque tous des coordonnées négatives. L'axe 1 est donc clairement un axe de présence/absence de structures. L'axe 2 oppose les structures en élévation des structures en creux. Les centres de gravité des relevés où des structures en élévations sont présentes ont de fortes valeurs sur cet axe. Pour la présence de structures en creux, ces centres de gravité ont des coordonnées proches de zéro voire négatives sur cet axe. Les relevés sur fosses se distinguent des autres relevés sur structures en creux. La coordonnée du centre de gravité des relevés présentant ce type de

structure est clairement négative sur l'axe 2.

7.3.1.4.4 Structuration spatiale des axes de l'AFM

Comme pour le site du Goënidou, il est nécessaire d'intégrer l'espace dans l'analyse de l'AFM. La prise en compte de l'espace est d'autant plus importante sur le site de Kervédan que les relevés sont regroupés en sondages. Il faut identifier les éventuelles différences pouvant exister entre sondages en termes de flore ou de typologie. Ceci est possible en représentant les relevés en fonction de leur appartenance aux différents sondages (fig. 71).

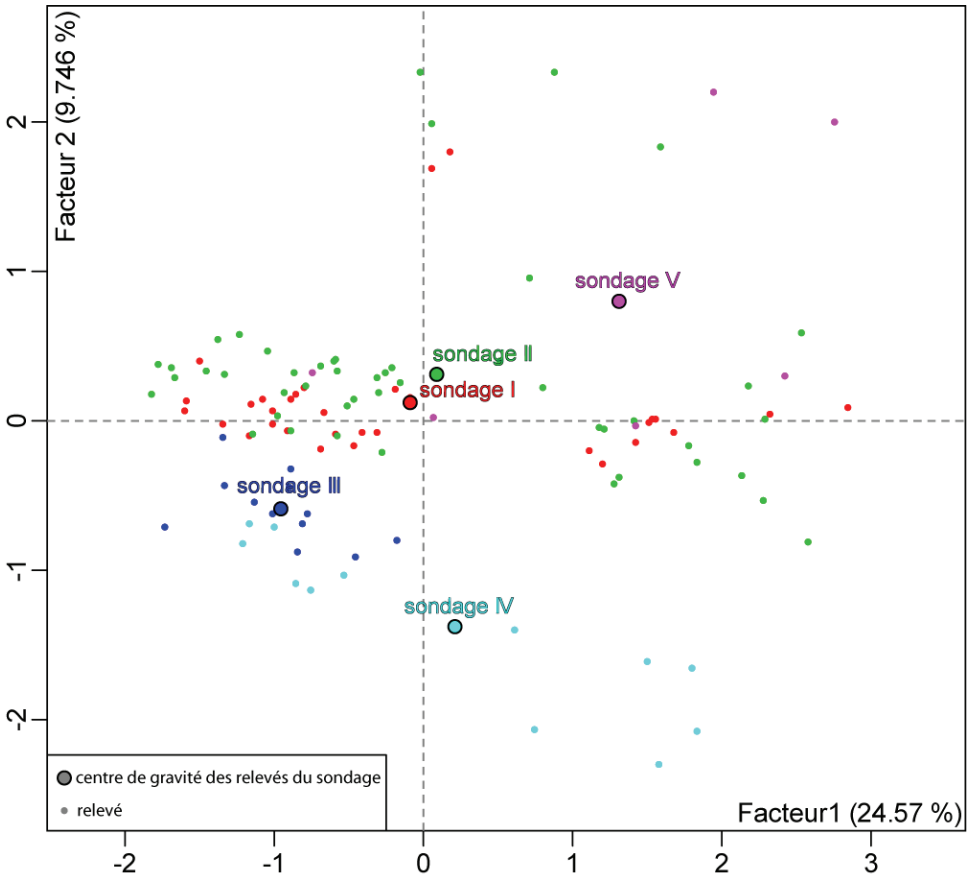


Figure 71 - AFM de Kervédan : représentation des sondages sur le premier plan factoriel

Le premier plan factoriel scinde les relevés en deux groupes distincts : ceux des sondages I, II et IV et ceux des sondages III et IV. Cette ségrégation spatiale s'opère suivant l'axe 2.

Les centres de gravité des relevés des sondages I et II ont des coordonnées proches de 0 sur les deux premiers axes. Ces sondages sont assez équilibrés. Ils sont représentatifs de l'hétérogénéité de la typologie. Ce sont les sondages présentant le plus grand nombre de relevés.

Le centre de gravité du sondage V se démarque par des coordonnées nettement positives sur les axes 1 et 2. Ce sondage est le plus petit. Il ne concerne que six relevés. Ils ne sont pas groupés autour du centre de gravité : ils sont assez épars. La position particulière du centre de gravité est donc attribuable à leur faible nombre. Ce sondage, de part sa faible taille, est par hasard anormalement plus riche en structures et notamment en élévation. Cette particularité lui confère cette place particulière.

Les centres de gravité des sondages III et IV sont aussi éloignés du centre du graphique. Le sondage III se caractérise par l'absence de structures. Cette spécificité est à l'origine des cordonnées négatives sur l'axe 1 des relevés le composant. Le sondage IV présente approximativement la même proportion de relevés sur structures que les autres sondages. Son centre de gravité a une valeur proche de 0 sur l'axe 1. Les valeurs négatives sur l'axe 2 de ces deux centres de gravité pourraient être expliquées par l'absence de structures en élévation sur ces sondages. Pour les relevés sans structures, représentés par les points à gauche du graphique, il y a aussi une discrimination de ces sondages par l'axe 2. Il n'y a pas de cause archéologique possible à cette distinction.

La cause de l'isolement des sondages III et IV suivant l'axe 2 est donc lié à la flore et non à la typologie. Il existe un lien entre la flore et un facteur extérieur influençant fortement cet axe 2. Ces deux sondages sont regroupés dans la partie ouest de l'éperon alors que les autres sont à l'est. Ils sont les plus exposés aux embruns. Cet axe est sûrement lié à un gradient est/ouest de salinité. Le sel a en effet une forte influence sur la nature de la flore.

Pour aborder ceci de plus près, il est possible de projeter les variables de localisation xy dans le cercle des corrélations (fig. 72).

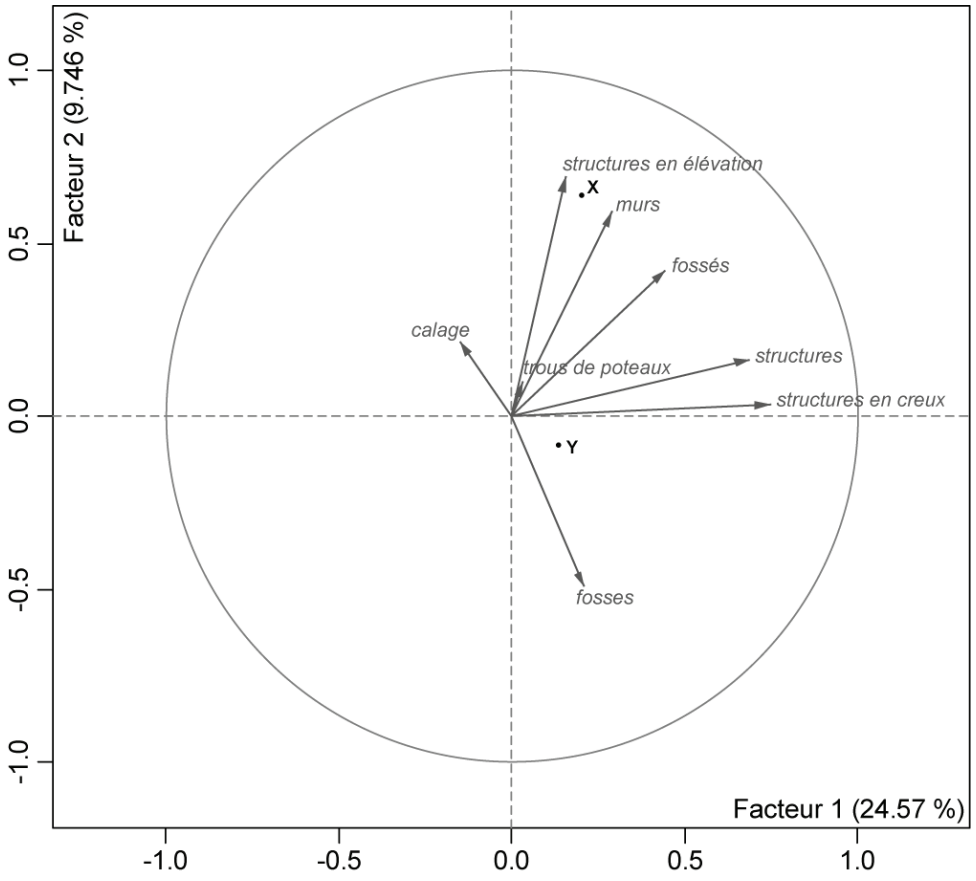


Figure 72 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des proximités aux différents types de structures et des coordonnées spatiales xy

La variable de localisation Y est très peu corrélée au premier plan factoriel. Ce n'est pas le cas de la variable X. Elle est très corrélée à l'axe 2. Cet axe est donc bien lié à un gradient est/ouest. Ce gradient est en partie de nature archéologique comme le montraient les inerties

par groupes. Seulement, il n'a pas de sens archéologique réel. Il isole en fait les relevés des sondages III et IV des autres. Il faut interpréter cet axe comme un gradient est/ouest et non comme une opposition entre structures en creux et structures en élévation. Les relevés contenant des structures en élévation sont d'ailleurs trop peu nombreux face aux relevés sur structures en creux pour avoir une réelle influence.

La projection des variables de proximité sur ce graphique est assez fidèle à l'analyse de typologie faite dans l'espace des relevés. L'axe 1 est très corrélé à la proximité des structures en creux. Ce sont donc elles qui ont réellement une influence sur la flore. Il est remarquable que la proximité au calage prend une coordonnée négative sur cet axe. Ce fait ne remet pas du tout en cause l'axe 1. Seuls deux relevés sont concernés par la présence de ce calage. D'un point de vue archéologique, ce calage n'est même pas confirmé, ce n'est qu'une structure potentielle. La flore indiquerait ainsi que ce n'est peut être pas une structure. Il est aussi possible de remarquer que la proximité aux fosses a une coordonnée négative sur l'axe 2 contrairement aux autres proximités. Il faut voir ceci sous l'angle spatial. Il n'y a eu que deux fosses détectées. Elles sont situées à l'extrémité ouest du sondage I et au milieu du sondage IV situé dans la partie ouest de l'éperon. La situation de ces structures globalement à l'ouest explique la coordonnée négative sur l'axe 2.

Ces précisions sur la structuration spatiale effectuées, il est possible de considérer le lien en structures et végétation.

7.3.1.4.5 Interprétation des axes de l'AFM en termes de composition floristique

La superposition sur le cercle des corrélations des variables de proximités aux structures avec les variables d'abondance/dominance des espèces permet d'analyser le rapport entre structures et végétation (fig. 73).

L'axe 1 sépare assez bien les espèces. L'espèce la plus caractéristique des structures en creux est le lotier *Lotus corniculatus*. D'autres espèces sont assez caractéristiques comme la carotte *Daucus carota*, la houlque laineuse *Holcus lanatus* et le dactyle *Dactylis glomerata*. La fétuque *Festuca rubra* et les agrostis *Agrostis stolonifera*, *Agrostis capilaris* ont aussi une affinité pour les structures mais moins marquée. Les fosses sont accompagnées du trèfle blanc *Trifolium repens* et du silène *Silene sulgaris* subsp. *maritima*. Hors structures, les espèces les plus caractéristiques sont l'orpin *Sedum anglicum*, le brome *Bromus hordeaceus* subsp. *ferronii*, le trèfle des champs *Trifolium arvense*, le plantain *Plantago coronopus* et la canche *Aira caryophyllea*.

L'axe 2 montre que certaines espèces poussent préférentiellement à l'ouest comme l'armérie *Armeria maritima*. C'est aussi le cas du trêfle blanc *Trifolium repens* et du silène *Silene sulgaris* subsp. *maritima* qui affectionnent les fosses. D'autres espèces poussent préférentiellement à l'est comme la canche *Aira caryophyllea*, le plantain *Plantago coronopus*, le dactyle *Dactylis glomerata* ou la carotte *Daucus carota*.

Deux espèces ne semblent pas influencées par les deux premiers facteurs comme le liondent *Leontodon saxatilis* et la porcelle *Hypochaeris radicata*. Ce sont des espèces présentes dans peu de relevés qui auraient pu être classées en espèces rares.

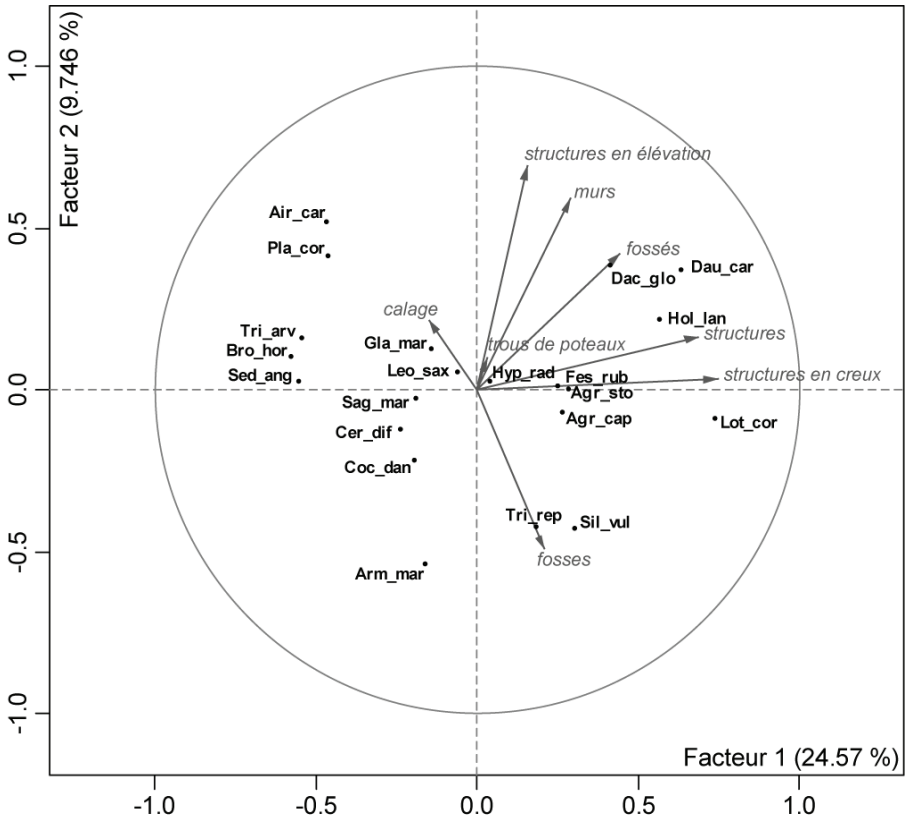


Figure 73 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des proximités aux différents types de structures et des abondances des espèces (*les codes utilisés pour les espèces sont ceux de l'annexe 9*)

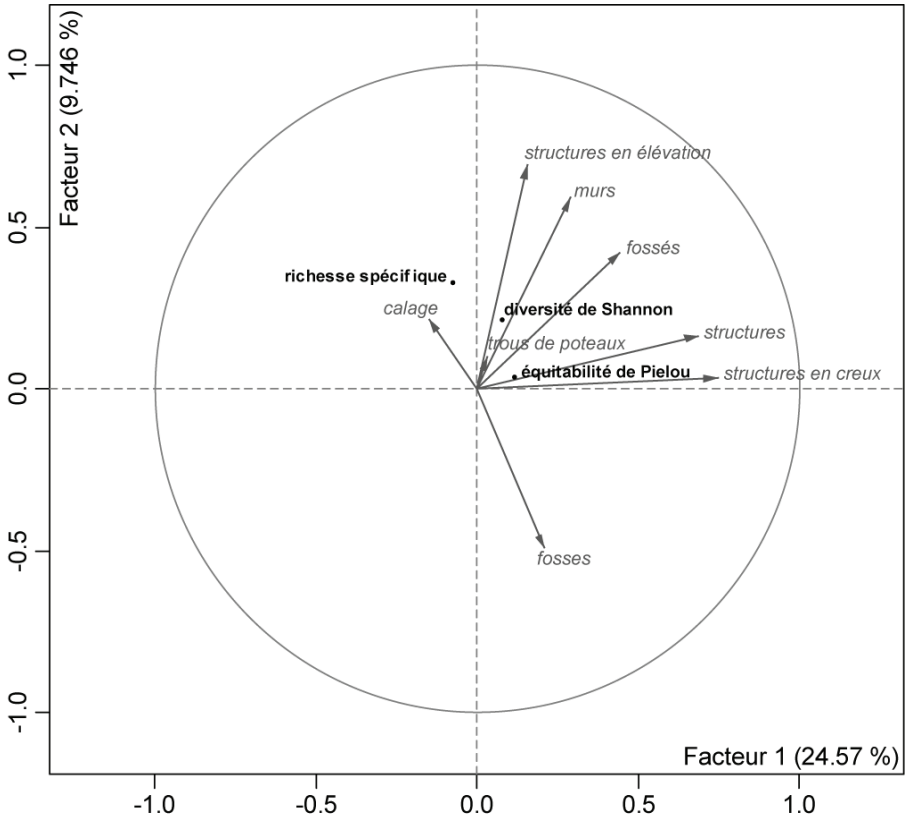


Figure 74 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des proximités aux différents types de structures et des variables de biodiversité

7.3.1.4.6 Comportement de la biodiversité vis à vis des structures

Les relevés peuvent aussi être vus de manière globale en analysant les variables de biodiversité (fig. 74).

La biodiversité ne semble pas très liée au premier plan factoriel. Toutefois, il ressort que les trois variables de diversité montrent des coordonnées positives sur le deuxième axe factoriel. Il est donc possible de dire qu'il y a un léger enrichissement de ces indices de biodiversité à l'est par rapport à l'ouest. La présence de structures ne semble pas modifier ces indices.

7.3.2 Discussion

7.3.2.1 Analyse du système de remparts

L'analyse sommaire du système de rempart montre que les différences de végétation au niveau des structures peuvent être très tranchées (fig. 64). La forme et les limites de ces dernières peuvent être facilement décelées. Ces différences n'apparaissent souvent clairement que lorsque l'existence des structures est connue à l'avance comme ici. Il apparaît aussi que se poster sur un point haut permet d'avoir une vue globale de la forme de ces anomalies végétales (fig. 65). Cette vision globale permet alors de voir la linéarité de ces structures, leur orientation et leur agencement dans l'espace. C'est cet agencement particulier qui permet aux archéologues aériens d'éliminer la possible origine naturelle de ces anomalies botaniques. Le manque de recul et de vision globale sur un site peut donc masquer l'évidente origine anthropique d'anomalies végétales comme celles-ci.

7.3.2.2 Analyse de *Daucus carota*

L'analyse de la carotte sauvage montre que cette espèce semble avoir une affinité nette pour les structures en creux (fig. 66). Sa cartographie suivant une maille de 6.25cm de côté (1/16 de mètre) atteste qu'il existe un lien très net entre les deux. Le changement d'échelle montre que la relation est plus nette pour des relevés en récurrence qu'en présence/absence et pour une maille maximale de 0.5 mètre de côté.

Pour la cartographie végétale de l'ensemble des sondages, il a donc été judicieux d'avoir relevé la flore en abondance/dominance suivant une maille de 0.5 mètre de côté au lieu du 1 mètre préconisé par l'étude d'aire minimale.

Cette analyse montre que l'étude classique d'aire minimale tend à surestimer l'aire des relevés à effectuer lorsque l'on est en présence comme ici d'une mosaïque de végétation. Ceci vient sûrement du fait que l'aire minimale est avant tout destinée à effectuer des relevés phytosociologiques s'intéressant à l'ensemble de la végétation et utilisés pour cartographier les changements morphologiques de la végétation à l'échelle du paysage. A la différence, les relevés phytoarchéologiques ont l'espèce comme objet d'étude et servent à étudier ses variations à l'échelle fine.

L'analyse phytoarchéologique d'une espèce doit donc se faire à une échelle différente des analyses classiques. Cette échelle d'étude doit bien sûr être inférieure. La taille de maille ne doit pas être trop faible pour éviter la création de puits ; c'est-à-dire la création de mailles

vides dans une zone où l'espèce est présente. La maille ne doit pas non plus être trop lâche afin de ne pas perdre en résolution, ce qui tend à perdre les contours de ces anomalies botaniques. Cette maille idéale doit être proche de l'espacement moyen entre deux pieds de l'espèce considérée, légèrement supérieure de préférence.

7.3.2.3 Analyse de l'ensemble des relevés

- ***Présence d'un lien fort entre flore et structures archéologiques***

L'analyse de l'ensemble des relevés confirme l'existence de corrélations entre les structures archéologiques et la végétation actuelle. Ces corrélations peuvent être abordées selon trois axes (tab. 7). Deux seulement sont suffisants au sens où la typologie archéologique générale peut être résumée par deux facteurs (tab. 6). Le lien global entre la typologie générale et l'abondance des espèces peut être observé grâce au graphique du carré des liaisons avec les deux premiers axes (fig. 53). Les deux groupes de données sont très liés, essentiellement à travers l'axe 1 de l'AFM. Les deux premiers facteurs représentent un peu plus d'un tiers de l'inertie cumulée des variables de typologie générale des structures et d'abondances des espèces. Comme pour Le Goënidou, L'AFM se révèle être un outil adapté pour révéler les liens existants entre structures archéologiques et végétation actuelle.

- ***Différences notables de la flore en fonction de la présence de structures***

L'axe 1 de l'AFM discrimine presque parfaitement les relevés par rapport à la présence/absence de structure (fig. 70). Ce premier facteur est très lié au premier axe factoriel de l'analyse séparée de la typologie générale qui discrimine les relevés en fonction de la présence/absence de structures (fig. 68). Cette dimension est aussi très corrélée avec le premier axe factoriel de l'analyse séparée de la flore. L'axe 1 de l'AFM explique environ 25% de l'inertie totale (tab. 5). Cette valeur n'est pas négligeable d'autant que l'analyse de la flore ne peut être résumée par un faible nombre d'axes (tab. 6). Il est possible à partir de ces données d'affirmer que la présence/absence de structure est de loin le principal facteur structural de la flore sur le site de Kervédan. Des différences de flore entre relevés hors structures et relevés sur structures archéologiques sont clairement repérables.

- ***Différences notables de la flore suivant un gradient est/ouest***

Ce deuxième axe est assez bien corrélé avec les deuxièmes axes des analyses séparées de la flore et de la typologie générale des structures (fig. 68). En termes de typologie, il permet de faire une distinction entre les structures en creux et les structures en élévation (fig. 70). Ce deuxième facteur de l'AFM permet aussi de structurer les relevés en termes de sondages (fig. 71). Le deuxième axe permet d'isoler les relevés des sondages III et IV. Les différents types de structures ne sont donc pas répartis de manière homogène entre les différents sondages. Il y a une structuration spatiale. L'axe 2 reflète en réalité l'existence d'un gradient est/ouest de la flore et de la typologie des structures (fig. 72). Or les relevés présentant des structures archéologiques en élévation sont très peu nombreux. L'axe n'a donc pas une réelle dimension archéologique. C'est en réalité un gradient est/ouest de la flore. Etant en bord de mer, cette dimension semble liée à un gradient naturel. La partie ouest de l'éperon est plus exposée aux vents et aux embruns.

- ***Différences peu marquées de la flore en fonction de la typologie des structures***

L'axe 2 est un gradient spatial naturel. Il exprime aussi l'opposition entre structures en élévation et structures en creux (fig. 72). Il est impossible de séparer les deux et donc de mettre en évidence la présence d'une végétation particulière sur les structures en élévation. La flore des structures en élévation ne semble pas différer de la flore de la partie est de l'éperon de manière générale. La majorité des relevés sur structures sont sur structures en creux. Les structures en creux hébergent une flore caractéristique des structures en général. Il est quand-même possible de parler d'influence de la typologie sur la nature de la flore sus-jacente au sens où les structures en élévation n'hébergent pas de flore particulière. L'analyse de la typologie détaillée semble aussi mettre en évidence des différences de flore entre les différentes structures (fig. 70). Cependant, les relevés sur chaque type de structures sont trop peu nombreux pour tirer de réelles conclusions sur la présence de différences marquées de la flore en fonction de la typologie des structures.

- ***Flore caractéristique des structures***

La fétuque *Festuca rubra* est l'espèce dominante sur l'éperon. Elle pousse de manière légèrement plus abondante sur les structures (fig. 73). Parmi les espèces accompagnatrice, l'espèce la plus caractéristique est le lotier *Lotus corniculatus*. Il peut même avoir de forts recouvrements et y être dominant. La carotte *Daucus carota*, la houlque laineuse *Holcus lanatus*, le dactyle *Dactylis glomerata*. le trèfle blanc *Trifolium repens*, le silène *Silene sulgaris* subsp. *maritima* et les agrostis *Agrostis stolonifera*, *Agrostis capilaris* sont aussi sont aussi plus abondants sur les structures.

Le sondage III ne présente pas de structure. Cependant, le lotier (*Lotus corniculatus*), une des espèces caractéristiques des structures en creux est abondamment présente. Ce fait illustre que la présence de structure n'est naturellement pas le seul facteur explicatif des différences floristiques observées. Il semble devoir sa présence à une diaclase du micaschiste (Cf. 7.3.1.1). Dans ce cas particulier, aucune autre espèce caractéristique des structures en creux n'est présente. Il faut donc se méfier lorsqu'une seule espèce indicatrice de structures est présente. Il semble qu'il y ait plus de chance d'être en présence d'une structure lorsque plusieurs espèces caractéristiques sont présentes et non une seule.

- ***Flore caractéristique des zones sans structures***

Les zones sans structures sont aussi caractérisées par une flore spécifique. Parmi les espèces abondantes, le plantain *Plantago coronopus* est plus courant hors structures. Il est accompagné d'espèces comme l'orpin *Sedum anglicum*, le brome *Bromus hordeaceus* subsp. *ferronii*, le trèfle des champs *Trifolium arvense*, l et la canche *Aira caryophyllea*. Ces espèces peuvent être favorisées par le recouvrement moins fort de la fétuque. La fétuque est cespiteuse. Les touffes peuvent former un tapis dense continu. Certaines espèces peuvent être gênées dans leur développement lorsque ce tapis est trop dense. Les zones sans structures étant caractérisées par un développement moindre de la fétuque, certaines espèces peuvent en profiter. La proportion de sol à nu a paru plus importante dans les zones sans structures en général. Cette caractéristique renforce cette hypothèse de phénomènes de compétition.

- ***Flore caractéristique de l'ouest de l'éperon***

Les espèces suivent un gradient écologique est/ouest. L'ouest de l'éperon est caractérisé par l'armérie *Armeria maritima*. Son recouvrement est nettement plus fort. D'autre espèces affectionnent l'ouest de l'éperon comme le trèfle blanc *Trifolium repens*, le silène *Silene sulgaris* subsp. *maritima* et le cranson *Cochlearia danica*. Il a été souligné que le trèfle blanc et le silène poussent préférentiellement sur les structures. Ce sont donc des espèces caractéristiques des structures de l'ouest de l'éperon. Pour le trèfle blanc, il ne pousse qu'au niveau de la fosse 2 du sondage IV. Le silène semble plus tolérant. Il pousse aussi sur certaines structures de l'est de l'éperon. La partie ouest de l'éperon est caractérisé par une biodiversité légèrement plus faible (fig. 72). Elle est plus exposée aux perturbations (vent et embruns). Naturellement, ce milieu plus perturbé voit sa biodiversité diminuer (Connel, 1978).

- ***Flore caractéristique de l'est de l'éperon***

D'après l'AFM, l'est de l'éperon est caractérisé par des espèces comme la canche *Aira caryophyllea*, le plantain *Plantago coronopus*, le dactyle *Dactylis glomerata* ou la carotte *Daucus carota*. Pour le plantain et la canche, l'analyse des cartes montre que ces espèces sont présentes sur les sondages III et IV. Ils ne sont donc pas caractéristiques de l'est de l'éperon par leur présence mais plutôt par un recouvrement légèrement plus fort. Le dactyle et la carotte sont des espèces préférentielles des structures. Elles sont absentes des sondages III et IV. Elles ne poussent donc que sur les structures de l'est de l'éperon.

7.4 Vérification du caractère « archéo-indicateur » pressenti d'une espèce par des fouilles systématiques (site de Pont-Calleck)

7.4.1 Résultats (annexe 10)

- **Sondage I (annexe 10a)**

Le sondage I présente, en son centre, un bosquet de fragon de 3 mètres de côté. Ce bosquet, discontinu, semble composé de plusieurs individus. A première vue, la limite ouest des pieds apparaît rectiligne. Au centre du bosquet, ainsi qu'au sud, se dressent deux poiriers sauvages (*Pyrus pyraster*). Leur présence sur les sites d'anciennes occupations humaines est depuis longtemps remarquée. Roupnel y voit des pieds relictuels de poiriers domestiques ayant retrouvés un phénotype sauvage (Roupnel, 1932). Cette espèce pousse aussi sur l'îlot d'habitat 2 du site du Goënidou.

Le décapage de la litière a permis de vérifier la présence de plusieurs individus de fragon. Ces individus peuvent toutefois être des clones séparés par la mort des parties les plus anciennes du rhizome. Une étude sur le type de développement végétatif de *Ruscus* avait déjà mis en évidence ce phénomène (Chamboredon & Forey, 2002). L'enlèvement de la litière a aussi permis de mettre au jour quelques blocs de granite erratiques, particulièrement dans le quart nord-est. A l'interface entre la litière (A00) et l'horizon organique (A0), de nombreuses

scories de coulée de fer sont apparues (en plus forte concentration dans le quart sud-ouest) (annexe 11).

Le décapage 1 a concerné l'enlèvement de l'horizon organique (A0). Au cours du décapage, des scories éparses ont été découvertes. Elles se rencontrent dans la majorité des carrés. De nouveaux blocs erratiques sont apparus dans le quart nord-est. Une passe d'enregistrement a donc été décidée sur ce quart du sondage. Elle concerne les carrés D4, D5, D6, E4, F4 où étaient visibles ces blocs. Dans chacun de ces carrés ont été observés des blocs mis de chant.

Le décapage de l'horizon hémi-organique (décapage2) a atteint le niveau dense de blocs et le substrat en l'absence de blocs (carrés A3, B2, B3, C1, C2, C3, D4, D5, D6, E4, E5, F4).

Les blocs erratiques sont surtout concentrés aux environs des carrés A3, E4, E5 et F4. Au niveau des carrés E4 et F4, un groupement de pierres mises de chant a pu être observé.

Le substrat, mis au jour dans tous les carrés A, B, C et D sondés, est un granite assez sain sans horizon d'altération sus-jacent. Des scories ont pu être observées jusqu'à la base de A1. Parfois, entre cet horizon et le substrat, s'insèrent des lentilles d'accumulation d'argiles.

De nombreuses diaclases peuvent être observées au niveau du substrat. Ces diaclases sont de deux types. Les premières, très rapprochées, suivent un plan horizontal avec un léger pendage à l'ouest. Elles donnent au granite une organisation générale litée. Les deuxièmes sont pseudo-verticales et ont une orientation dominante nord/sud, mais parfois aussi est/ouest. L'association de ces différentes diaclases a fragmenté le substrat en modules de taille variable mais d'épaisseur relativement fine (de l'ordre du décimètre).

Quant aux artefacts, aucun élément autre que les scories n'a été trouvé.

- **Sondage II (annexe 10b)**

Le sondage II présente, en son centre, un pied de fragon dont le houppier s'étend à peine sur un mètre carré. En limite de sondage, au nord, se dresse un jeune chêne (Ø 15 cm environ).

Le décapage de la litière a permis de vérifier que l'on n'était en présence que d'un seul individu. Quelques blocs, émergeants de l'horizon A1, sont apparus dans les carrés sondés (A1 et B2).

Après décapage de l'horizon organique, de nouveaux blocs, pour la plupart erratiques, ont été mis au jour. Quelques scories ont aussi été retrouvées dans le carré B2, à l'interface entre A1 et A0 (annexe 11).

De gros blocs ont été finalement dégagés dans les deux carrés sondés. Malgré la faible surface du sondage, il semble que ces blocs correspondent au substrat fracturé plus ou moins en place. En effet, les orientations de ces blocs font penser aux diaclases est/ouest et nord/sud observées sur le sondage I. Au niveau de l'emplacement du pied de fragon, de petits blocs erratiques ont aussi pu être mis au jour. Une lentille d'accumulation d'argile a aussi été découverte au niveau de la coupe est du carré A1.

Comme pour le sondage I, aucun artefact autre que les scories n'a été repéré.

- **Sondage III (annexe 10c)**

Le pied de fragon ayant fait l'objet du sondage III (de 1 mètre de coté) présente un houppier de 50 centimètres de diamètre environ. Ce pied, de faible taille, parait unique. Il est situé sur le versant sud d'un ourlet d'effondrement d'un probable mur de bâtiment. A l'extérieur du sondage, à l'ouest, pousse un jeune chêne lui aussi situé sur l'ourlet.

Les quarts nord-ouest et sud-est ont été laissés comme témoins, lors de ce premier décapage. Le pied de fragon étant légèrement décentré au nord-est, celui-ci a pu être préservé par le décapage. Dès l'enlèvement de la litière et de l'horizon organique, sur les deux quarts du carré concernés, de nombreux blocs de granite sont apparus.

Le décapage de la litière et de l'horizon organique sur les quarts restants (nord-ouest et sud-est) a tout d'abord permis de vérifier la présence d'un seul et unique pied de fragon. Celui-ci est situé sur une ligne de parement est/ouest centrale. Le décapage s'est arrêté aux deux premiers niveaux de parement. Au nord, une multitude de petites pierres dominent cette ligne de parement. Ces blocs font penser, soit à un système de blocage entre deux parements, soit à un niveau d'effondrement. Au sud, quelques rares gros blocs sont visibles en contrebas. Ils évoquent, de par leur position et leur calibre, des blocs de parement effondrés.

Etant donnée la faible épaisseur sédimentaire dégagée, les coupes n'ont pas été relevées.

- **Sondage IV (annexe 10d)**

Au niveau du sondage IV, deux pieds de fragon ont été sondés. Ils sont espacés d'environ trois mètres. Le pied nord-est n'est représenté que par une seule tige (carré E3). L'autre pied, nettement plus important, a un houppier s'étalant sur environ 1 mètre carré (carrés B2 et B3). Il est situé au pied du hêtre le plus gros de la parcelle (40 cm de diamètre environ). Ce hêtre est vraisemblablement un ancien semencier, épargné par les coupes forestières. De nombreux pieds de millet sont visibles. Ils créent une « tache » autour des pieds de fragon. La présence préférentielle du millet sur les sites archéologiques forestiers a déjà été remarquée (Dupouey *et al.*, 2002). Cette espèce a donc aussi été cartographiée.

Les décapages n'ont concerné que les carrés A2, B2, C2, D3, E3, F3. Lors du décapage de la litière, il est apparu que les deux pieds de fragon, sûrement non clonaux, étaient chacun constitués d'un seul individu. En revanche, les pieds de millet sont discontinus. Cette «tache» est donc constituée, a priori, de plusieurs individus. Les pieds peuvent toutefois paraître séparés par la mort de parties liantes anciennes et ainsi ne représenter qu'un seul et même individu. Ceci pose le même problème que pour le fragon du sondage I. Aucun bloc n'est apparu par simple enlèvement de la litière.

Les horizons A0 et A1 étant assez épais, ils ont fait l'objet de trois décapages (décapage 1, 2 et 3). L'autre cause de multiplication des décapages est la découverte, dès les premiers centimètres de ces horizons, d'une forte concentration de céramique. Ces tessons ont essentiellement été repérés au niveau des carrés D3 et E3 au décapage 2. Les céramiques, présentant en général des cassures assez fraîches, ont fait l'objet d'une étude (annexe 12). En dehors des céramiques, quelques blocs sont apparus. Un bloc de gros calibre est notamment apparu au niveau du carré B2, quasiment sous le fragon. L'avancement de la fouille des carrés A2, B2 et C2 a été ralenti, par rapport aux autres carrés, par la présence de nombreuses

racines. C'est pourquoi ces carrés ont systématiquement été décapés moins profondément que leurs homologues. D'un point de vue stratigraphique, l'horizon A1 est assez peu épais au nord-est, d'où une apparition rapide de l'horizon B en F3, dès le décapage 1.

Au décapage 3, au niveau des carrés D3, E3 et F3, l'horizon A1 a fini d'être dégagé, afin de laisser apparaître l'horizon B. Au niveau de la zone de forte concentration de céramiques, de nombreux blocs émergent de cet horizon. Aucune organisation remarquable ne peut être mise en évidence, à part deux blocs mis de chant en limite nord-est. Au niveau des carrés A2, B2 et C2, le décapage a aussi été poursuivi. L'importante concentration de racines n'a cependant pas permis de finir de dégager l'horizon A1 pour ces carrés.

- **Sondage V (annexe 10e)**

Ce bosquet de fragon est de taille assez importante et mesure environ deux mètres sur trois. Il se développe au sud d'un pied de merisier d'une vingtaine de centimètres de diamètre. Afin d'éviter tout souci avec les racines de cet arbre à la fouille, seul le quart sud-est a été cartographié et fouillé. Ainsi, le bosquet est représenté sur le sondage au niveau des carrés B2 et B3. Aucun bloc n'est visible en surface.

Après enlèvement de la litière, aucun bloc n'est apparu. Le fragon semble divisé en deux pieds, du fait de leur séparation racinaire. Cependant, il n'est pas possible d'affirmer, comme il a été dit précédemment pour le sondage I, que ces pieds ont pour origine des propagules différentes.

Le décapage 1 a concerné les carrés A3, B1, B2 et B3. Le carré A3 a fait l'objet d'une sous passe (décapage 1b). Quelques blocs de quartz sont apparus en surface de l'horizon B. Certains éclats présentent des traces de taille intentionnelles. Les blocs de plus gros calibre ont été retrouvés en B2. En A3, une bande de sédiment plus sombre entaille l'horizon B. Elle recoupe aussi la partie inférieure plus grisâtre de l'horizon A1 (A1b est absent dans la coupe est/ouest, au niveau du passage de cette bande). Cette bande est en partie bordée, à l'ouest, par un niveau de cendres discontinu. Aucun charbon n'a été retrouvé. A la fouille, les sédiments aux alentours ont paru beaucoup plus compactés que dans les carrés B. Cette bande nord/sud semble correspondre à une ancienne ornière.

Lors du décapage 2 (carrées B1, B2 et B3), quelques nouveaux blocs sont apparus en B2. Ils n'ont pas été enregistrés. Tous ces blocs semblaient organisés en une ligne perpendiculaire à l'ornière. Ils suivent approximativement la limite sud du fragon. En dehors des blocs, le sédiment est resté stérile.

- **Sondage VI (annexe 10f)**

Pour le sondage VI, il a été décidé de sonder la moitié nord du pied de fragon (houppier de 80 centimètres de diamètre environ), tout en évitant les lignes de plantation de hêtres. La moitié du pied a été sondée au niveau du carré B1 et la fouille du carré A1 a été réalisée comme témoin. Ce pied de fragon se situe au milieu d'une zone de millet qui s'étale sur une vingtaine de mètres carrés. Ce millet a lui aussi été cartographié au niveau des deux mètres carrés du sondage. Les pieds sont discontinus et répartis sur l'ensemble des deux mètres carrés. En surface, aucun bloc n'est apparent. Une vieille souche est visible à l'ouest du

sondage, au niveau de la coupe.

En décapant la litière, comme à chaque fois, il a été facile de cartographier l'emplacement du pied de fragon et sa zone d'influence racinaire. L'emplacement exact des pieds de millet a, lui aussi, été noté. Aucune pierre, ni aucun artefact, n'est apparu émerger de l'horizon A1.

La fouille de l'horizon A0 n'a mis au jour aucun artefact, à part quelques petites pierres en surface de A1.

L'horizon A1 étant assez épais, il a fait l'objet de deux décapages (décapage 2 et 3). Lors du décapage 2, seuls quelques petits graviers, ainsi qu'un rebord de céramique, sont apparus (annexe 12). Ceux-ci peuvent éventuellement délimiter un niveau qui n'aurait pas été identifié à la fouille.

A la fin de l'enlèvement de l'horizon A1, dans la partie ouest du carré A1, des blocs ont commencé à apparaître. En poursuivant le décapage, dans la partie est du carré B1, d'autres blocs sont ressortis. Contrairement à ceux du carré A1 pris dans l'horizon A1, ces derniers font partie de l'horizon B et sont scellés par l'horizon A1b, variante grisâtre inférieure de l'horizon A1 (déjà observée au sondage V proche). Dans cet horizon A1b, totalement à l'est en limite de coupe, ont été retrouvés deux tessons. Entre les deux amas de pierres, l'horizon B sous-jacent à A1 a été dégagé sans qu'aucun bloc n'apparaisse. La limite entre cet horizon B et l'horizon A1 pierreux, à l'ouest, est assez bien marquée. Les sondages devant être le moins destructif possible, la fouille s'est arrêtée à ce niveau.

- **Sondage VII (annexe 10g)**

Le pied faisant l'objet du sondage VII (1 mètre de côté) est situé au niveau de la rupture de pente du plateau (Cf. 5.4.2.3). Ce pied, de faibles dimensions, pousse en contrebas d'une vieille souche en décomposition, entre deux jeunes hêtres d'une ligne de plantation.

Le pied de fragon se développe directement en contact avec la vieille souche. Cette souche est couverte de mousses et de lierre. Le décapage de la litière a mis au jour un horizon A0, assez noir, vierge de blocs en surface.

Afin de garder le pied de fragon dans une coupe, le décapage n'a concerné que la partie sud-est du carré (70 centimètres de côté). L'horizon A0 s'est révélé très sombre et assez épais, avec des incursions profondes liées à la décomposition d'anciennes racines de la souche. Dans l'horizon A1, lui aussi très organique, quelques blocs sont apparus. Cet horizon A1 repose sur un horizon minéral très rougeâtre. De ce nouveau sédiment émergent quelques plaquettes de granite mises de chant. A l'interface avec l'horizon A1, un tesson de céramique est ressorti (annexe 12).

7.4.2 Discussion

Pour chaque sondage, il est possible de reconstituer l'histoire des processus archéologiques et sédimentaires. La dynamique végétale est naturellement discutée, que ce soit pour la mise en place de la forêt ou du fragon.

7.4.2.1 Discussion individuelle pour chaque sondage

- ***Sondage I et II***

La séquence sédimentaire enregistrée a été la même au niveau des sondages I et II. Pour

cette raison, ces deux sondages sont ici discutés ensemble.

Dans une première phase, la zone a servi de carrière d'extraction de pierres. Le substrat était au jour (affleurement) ou a été mis au jour. Son mode de fragmentation, en petits modules, a permis une exploitation facile de blocs. La fraîcheur relative des arêtes, l'absence d'horizon d'altération B et la forte densité de blocs erratiques sont les témoins de cette exploitation. Pour le sondage I, le substrat disparait à l'est des carrés D4, D5 et D6 et semble délimiter un front de taille. Dans les carrés E4 et E5, un groupe de pierres de chant, lié à cette phase, semble former une structure quadrangulaire. Celle-ci n'a pas été fouillée. Par ailleurs, il est impossible de dater cette occupation du fait de l'absence d'artefact. L'extraction peut toutefois être attribuée à une phase de besoins de blocs de construction pour la mise en oeuvre des talus ou des bâtiments à proximité. Le matériel retrouvé lors des sondages de J.-P. Bardel (Bardel, 1976, 1977, 1978, 1980) daterait ces constructions de l'époque romaine ou médiévale.

Quelques lentilles d'accumulation d'argiles apparaissent au-dessus du substrat, notamment au niveau des diaclases. Ce sédiment, visible à hauteur de cuvettes, est le produit d'un lessivage d'argiles provenant des alentours. Il illustre un abandon de l'exploitation. La vitesse d'accumulation d'argiles étant dépendante de l'environnement immédiat et des pratiques culturales, il n'est pas aisé de déterminer la durée de cet abandon. Toutefois, la faible épaisseur d'argiles et l'état de fraîcheur des blocs tendent à indiquer une phase d'abandon relativement courte.

Après cet abandon d'activité, il semble que l'on ait affaire à une phase d'apport massif de sédiment anthropique. En effet, directement au-dessus de ce niveau, on perçoit les horizons A1 et A0. Ils sont relativement homogènes d'un point de vue sédimentaire comme d'un point de vue artefact (scories de coulée). Cet apport très conséquent de sédiment est donc postérieur à une production métallurgique sur le site. D'après les fouilles de 1977, la production y est attestée tôt. Une fosse à scories a été retrouvée sous les fondations d'un bâtiment médiéval, situé au nord de nos deux sondages. Une production postérieure, voire antérieure, a toutefois pu être réalisée en d'autres endroits du site. Cet apport massif de sédiments a permis de combler la zone d'extraction et aplanir le sol. L'apport conséquent de scories dans ce sol peut être volontaire dans le cadre d'une mise en culture. En effet, leur amendement dans les sols agraires est bénéfique par l'apport d'éléments minéraux. L'emplacement des deux sondages se situe sur un petit replat aménagé, situé entre un bâtiment, apparemment médiéval par homologie à ceux fouillés par J.-P. Bardel, et un talus. Ceci évoque fortement une parcelle de culture domestique accolée audit bâtiment et donc potentiellement contemporaine de ce dernier. La présence de «boulettes» d'argiles dans l'horizon A1, témoins d'un probable remaniement des sols par labour, conforte cette hypothèse de mise en culture.

Après abandon, la forêt s'est réinstallée. Cette installation se traduit par l'incorporation dans les sols, de matière organique (A0), issue de la décomposition de la litière (A00).

Pour sa part, le fragon semble s'être installé après l'abandon du site (stade forestier ou pré-forestier). En effet, celui-ci ne peut, en aucun cas, s'être développé avant l'apport de sol. Il aurait aussi eu du mal à résister et se développer face aux labours éventuels. Toutefois, il aurait aussi pu être introduit par l'homme pour ses propriétés et donc éventuellement «mis en

culture». Cependant, il faut rester prudent sur ce genre d'hypothèse car à notre connaissance, il n'existe pas d'équivalents ethnologiques.

- ***Sondage III***

Au niveau du sondage III, la séquence est relativement simple.

Un mur de bâtiment a tout d'abord été construit à l'aide de blocs de granite. La technique utilisée semble la même que pour les habitats médiévaux fouillés par J.-P. Bardel (Bardel, 1976). Les murs sont constitués de deux parements, retenant un blocage de blocs de très petits modules. La technique utilisée est aussi celle de la pierre sèche. En l'absence d'élément datant, le rapprochement des modes de fabrication peut permettre d'évoquer une élaboration de ce mur à l'époque médiévale.

A l'abandon du bâtiment, la toiture et la charpente, faites de matériaux périssables, ont disparu. Les murs de soutènement, alors exposés, ont commencé à s'effondrer. Certains blocs de parement se retrouvent ainsi au pied du mur. La végétation forestière ne tarde pas à s'y installer. La chute régulière des feuilles a permis la création d'un humus. Présent avant la fouille, celui-ci scellait l'ourlet d'effondrement.

Le pied de fragon semble s'être installé après l'effondrement du mur. Il est positionné directement sur un niveau de parement. Il est donc postérieur à l'effondrement de la charpente et à l'abandon. Certains blocs en contrebas semblent les témoins de l'effondrement d'un parement supérieur. La présence de pierres de blocage, bien au dessus topographiquement des blocs de parement, renforce cette hypothèse d'un mur plus haut. L'implantation du pied de fragon, de par sa position, serait ainsi postérieure à la création de l'ourlet d'effondrement. Ce pied se serait ainsi, au plus tôt, implanté à la période médiévale ou post-médiévale. Il est aussi possible de placer cet épisode, au regard de la végétation observable sur des bâtiments sub-actuels en cours d'effondrement, dans un stade pré-forestier voire forestier. Il semble totalement inconcevable que le fragon ait été planté par l'homme dans ce cas précis.

- ***Sondage IV***

La séquence du sondage IV, même si la fouille est restée superficielle, apporte de nombreux renseignements.

L'horizon B, mis au jour dans les carrés D3, E3 et F3, présente une dépression en E3 et F3. Au niveau de cette dernière, un amas de pierres, relativement absentes ailleurs, est visible. Cet amas est bordé, au nord, par deux pierres de chant. Ceci laisserait supposer que ces pierres sont le remplissage d'une structure en creux. Cependant, aucune différence nette au niveau de la matrice n'a pu être observée. Au niveau des carrés A2, B2 et C2, la forte densité de racines n'a pas permis de décaper jusqu'à cet horizon B. La limite sud de cette structure n'a donc pas pu être abordée.

Directement au-dessus de cet horizon B, se développe l'horizon A1. De très nombreux tessons de céramique onctueuse médiévale y ont été trouvés. Leur présence dès la base de A1, notamment en F3 hors structure, permet d'affirmer que l'horizon B était en surface lors de ce «dépôt» de céramique. Le milieu de dépôt était *a priori* ouvert (absence d'humus). Cette céramique onctueuse est particulièrement abondante au sein des carrés D3 et E3, au-dessus de

la structure détectée. Ceci conforte l'hypothèse d'une structure en creux, remplie dans un premier temps par un amas de pierre. Le deuxième remplissage a un caractère clairement détritique ; outre la céramique, de nombreux charbons ont aussi été détectés à la fouille. Quelques mètres à l'est, un bâtiment déserté est visible en microtopographie. Il ne fait aucun doute que ce niveau détritique est lié à la présence adjacente de ce bâtiment. Ainsi, son occupation pendant la période médiévale tardive semble en découler. Les tessons d'onctueuse ont été retrouvés de la base de A1 à la surface. La formation de cet horizon est donc relativement rapide et attribuable à la période médiévale. En A2 et B2, quelques gros blocs, révélateurs possibles d'autres structures non détectées, faute de décapage suffisant, sont visibles au sein de l'horizon A1.

Pour sa part, la formation des horizons A0 et A00 résulte de l'implantation forestière. La présence de tessons, dès la surface, indique l'absence de dépôt sédimentaire postérieur. Or, en milieu ouvert, l'érosion et les transferts de sédiments sont importants. L'abandon et la fermeture du milieu semblent ainsi intervenir assez tôt après le dépôt de céramique.

Les pieds de fragon se sont, a priori, implantés postérieurement au comblement médiéval. En effet, cette espèce n'aurait pu résister à la perturbation du creusement ou à celle du comblement. De plus, il serait incongru d'implanter une structure à l'emplacement d'un pied de fragon, du fait de son caractère épineux. Son développement est donc postérieur. Toutefois, il faut émettre la possibilité d'apport de propagules (graines…) lors du comblement. Ceci est éventuellement envisageable dans le cas d'une utilisation de *Ruscus* pour ses propriétés. Cependant, le pied sud est postérieur à ce dernier puisqu'il se développe au dessus d'un gros bloc de ce dépôt. Dans ce cas, les pieds se sont donc implantés dans un milieu en cours de fermeture, voire déjà forestier, au mieux à la fin de l'époque médiévale. Le même raisonnement peut être appliqué au cas du millet, présent sur ce sondage.

- ***Sondage V***

Pour le sondage V, la séquence sédimentaire est la suivante. En surface de l'horizon B, quelques éclats de quartz taillés ont pu être repérés à la fouille. Il y a donc eu une activité humaine en ce lieu alors qu'il était *a priori* en milieu ouvert (absence d'humus). L'absence d'éléments de datation ne permet pas de placer cet épisode dans un cadre chronologique. Lors du décapage 2, l'horizon B (carrés B1, B2 et B3) est apparu assez meuble. Un labour ancien peut être envisagé dans ce milieu, que l'on pense ouvert. Au niveau du carré A3, cet horizon est incisé par une ornière nord/sud. Cette ornière est le vestige d'un ancien chemin totalement disparu. L'absence de deuxième ornière dans les carrés B1, B2 et B3 fait pencher pour l'existence de cette dernière plus à l'ouest. La présence d'une lentille cendreuse, bordant l'ornière à l'ouest, directement sur l'horizon B, permet d'attester la contemporanéité du chemin avec le niveau d'éclats de quartz. D'ailleurs, de chaque coté du passage de roue, l'horizon B est particulièrement tassé. Ces cendres sont à rapprocher de la présence d'une charbonnière à quelques mètres au nord-ouest. Le milieu a priori ouvert n'est pas forcément incompatible avec les activités de charbonnage, celles-ci ayant lieu parfois en clairières. L'hypothèse d'un labour n'est pas non plus aberrante ; lors de l'érection d'une fouée, le sol est labouré pour permettre un charbonnage jusqu'à la base. Approximativement

perpendiculaire à l'ornière, un vague alignement de petits blocs de quartz émerge de l'horizon B. Cette ligne de blocs est n'est pas interprétable mais semble anthropique, du fait de l'absence de blocs dans le reste de l'horizon B fouillé.

Directement sur cet horizon, vient se placer un niveau hémi-organique grisâtre (A1b). Cet horizon peut être anthropique mais il semble plutôt le résultat d'une fermeture du milieu. Cet horizon n'est pas présent dans la coupe au niveau de l'ornière. Le chemin semble donc encore actif pendant cette période. La couleur grisâtre du sédiment peut éventuellement être due à la présence de cendres dispersées par le vent. Si tel est le cas, la formation de cet horizon peut être liée à l'activité de charbonnage adjacente.

Au niveau supérieur, l'horizon hémi-organique perd sa couleur grisâtre. Si cette couleur est liée à la présence de cendres, ceci peut être lié à l'arrêt des activités de charbonnage adjacentes. Cet horizon hémi-organique A1 est ininterrompu et scelle l'ornière. Le chemin cesse donc d'être utilisé. Une telle correspondance conduit à s'interroger sur l'utilité de ce chemin. Il y a de grandes chances que ce dernier soit un sentier de desserte de charbonniers. La dynamique forestière a ensuite permis la création d'un humus (A0 et A00). Les horizons A1, A0 et A00 sont vierges de tout indice anthropique. Aucun bloc n'y a été trouvé. Cette dynamique naturelle, où n'interviennent apparemment plus de facteurs anthropiques, peut correspondre à l'arrêt du charbonnage sur la parcelle. Les causes peuvent être dues à une baisse de production (épuisement sylvicole) ou à une baisse de rentabilité (mobilité ou arrêt des activités métallurgiques motrices des activités de charbonnage…).

Le pied de fragon trouvé ici n'étant pas présent directement sur le chemin, il n'est pas possible de dater son implantation. Il semblerait, s'il y a bien eu labour, qu'il se soit développé au plus tôt, au début de fonctionnement du chemin. Il est accompagné d'autres pieds. Un de ces pieds pousse sur la charbonnière et lui est donc postérieur. Un gros bosquet pousse sur le talus marquant la lisière forestière. Ce talus recoupe la charbonnière. Ce gros bosquet est donc nettement postérieur aux activités de charbonnage. Le pied concerné par la fouille, faisant partie de la même population, a ainsi de grande chance d'être lui aussi postérieur à ces activités de charbonnage.

- ***Sondage VI***

Pour le sondage VI, on obtient la séquence suivante. Deux amas de pierres ont été mis au jour lors du décapage final. Dans la partie est, des blocs émergent de l'horizon B. La situation ressemble beaucoup à celle du sondage IV. Cette disposition peut aussi évoquer une structure en creux, comblée par un ensemble de blocs. Cependant, aucune différence de matrice sédimentaire n'a clairement pu être remarquée. Ces blocs et l'horizon B sont scellés par un horizon A1b grisâtre, rappelant celui du sondage V proche. Dans cette couche, trois tessons ont été trouvés au niveau de l'amas pierreux. La pâte d'un tesson suggère une éventuelle datation antique. A l'ouest, un deuxième amas pierreux se dessine. Il est scellé par l'horizon A1 et paraît donc postérieur. La limite avec l'horizon B attenant est très nette. On pourrait penser à une structure en creux postérieure ayant entaillé les horizons A1 et B. Elle aurait ensuite été comblée avec des blocs, entre lesquels le sédiment A1 aurait percolé. Toutefois, seule une fouille fine et plus extensive pourrait le confirmer.

Scellant toutes ces structures, l'horizon A1 est quasiment vierge d'artefacts. Il marque la déprise anthropique et la conquête forestière. Quelques blocs sont tout-de-même visibles à la base. En surface de A1, quelques petits gravillons semblent délimiter un niveau. Un tesson de céramique onctueuse a été trouvé associé à ce niveau. Il y a donc eu en ses lieux quand-même des activités sylvicoles assez importantes pour laisser leur empreinte dans les sols.

Les horizons supérieurs de l'humus forestier (A0 et A00) sont totalement vierges d'artefacts et se sont développés après ces activités.

Le pied de fragon ayant fait l'objet de ce sondage est situé juste au-dessus de la première structure en creux présumée. Il faut supposer un lien physico-chimique entre la nature du remplissage et la présence du fragon. Il est certainement postérieur à son remplissage. Mais il a de grandes chances d'être aussi postérieur au niveau de gravillons. Pour le millet, les pieds sont répartis sur l'ensemble du sondage. Ils sont donc a priori postérieurs eux aussi au dépôt du lit de graviers qui est médiéval ou post-médiéval, du fait de la présence d'un tesson d'onctueuse.

- ***Sondage VII***

Le sondage VII étant très réduit, sa séquence est relativement simple.

A la base, un horizon minéral très rougeâtre scelle un niveau de blocs. Ces pierres étant mises de chant, la rupture de pente sur laquelle a été implanté le sondage est donc clairement anthropisée. On a donc affaire à un rebord de plateau aménagé en une terrasse est/ouest. Sur l'interface de l'horizon minéral, un tesson a pu être trouvé. Il renforce le caractère anthropique de cette structure.

Directement au-dessus, se développe un horizon A1 ayant piégé un certain nombre de blocs erratiques. Ce niveau très organique a dû se développer à partir de restes végétaux, après végétalisation de la terrasse ou recolonisation forestière. Les blocs piégés ne semblent pas organisés. Ils proviennent sûrement du colluvionnement du plateau, voire d'une éventuelle structure en élévation soulignant la rupture de pente.

L'humus qui scelle le tout est ici particulièrement épais et noirâtre. Il provient en partie de la décomposition d'une souche de taillis. D'ailleurs, des incursions profondes d'humus marquent les emplacements d'anciennes racines en décomposition.

Au regard de la perturbation résultante, ce pied de fragon semble postérieur à l'aménagement de la terrasse. Il est situé au pied d'une souche. Cette localisation particulière peut éventuellement être le témoin d'une ornithochorie. En effet, les oiseaux se servent généralement des arbres comme perchoir et y digèrent. Il n'est d'ailleurs pas rare, notamment dans les haies, de trouver du fragon accolé à un arbre ou une souche. Un tel emplacement est un microhabitat particulier (forte accumulation de matière organique, modifications du drainage par les racines). Le fragon pourrait trouver un habitat favorable, à ces différentes conditions édaphiques. L'arbre peut aussi se développer après le fragon. Cette possibilité avait été émise par E.M. Hillman et A. Warren (Hillman & Warren, 1973). Cette hypothèse résulte de l'observation de cercles de fragon autour d'arbres ou de vieilles souches. L'absence de fragon au centre, jusqu'à un mètre de l'arbre, semblait indiquer la mort des rhizomes face à un phénomène de compétition interspécifique.

7.4.2.2 Discussion générale sur l'ensemble des sondages

Pour les sept sondages réalisés ici, des structures ou des indices d'occupation ont été trouvés. Il semble très peu probable que les pieds de fragon aient été amenés par l'homme. En effet, ces pieds sont, dans la majorité des cas, clairement postérieurs à l'abandon de ces structures.

L'hypothèse du fragon indicateur d'ancienneté avancée par C. Perrein (Perrein, 1984, 1986, 1987a, 1987b, 1991a) n'est pas forcément si solide. Le fragon, comme il l'avait montré, n'est pas un très bon colonisateur. Cependant, les sept cas exposés ici montrent que les pieds sont tous assez récents à l'échelle de l'histoire du site.

La parasylvigénéité des talus avait été proposée comme facteur explicatif de la présence de *Ruscus* dans les haies, la forêt étant alors considérée comme une sorte de zone refuge. Dans le cas de la forêt de Pont-Calleck, des talus et terrasses visibles en microtopographie sont repérables dans toutes les zones prospectées. Le passé de cette forêt semble donc purement agraire. Toutefois, il arrive parfois de voir certains bosquets entourés de talus. L'emplacement de certains pieds de fragon (anciennes terrasses, bord de chemin…) fait tout de même plus penser à des pieds s'étant développés dans un milieu semi-ouvert et devenu intra-forestier depuis. La question d'espèce forestière, au sens strict, semble donc se poser. Il semblerait ainsi que le fragon soit plutôt une espèce de milieu semi-ouvert tolérante à la fermeture du milieu.

Les résultats présentés par C. Perrein (Perrein, 1984, 1987a, 1991a), au niveau de son étude sur un chemin recalibré, sont vraiment très parlants (Cf. 3.3.5). Toutefois, le facteur âge n'est pas forcément le seul facteur explicatif. Les talus créés après recalibrage n'ont pas forcément été érigés avec les mêmes méthodes que les talus non recalibrés. Lors de cette opération, des sédiments différents ont pu être utilisés. Un talus peut être fait avec la terre extraite du fossé. Dans ces conditions, la surface du talus se retrouve composée de l'horizon creusé en dernier. Le talus ainsi bâti a alors une surface très minérale. Un talus peut aussi être érigé par étrépage des horizons superficiels. Dans ce cas, il est beaucoup plus organique. Des usages différents peuvent ainsi créer des structures similaires. Du fait de gestes de construction différents, la végétation peut aussi ne pas réagir de la même manière sur deux structures équivalentes. Concernant les haies étudiées par C. Perrein (Perrein, 1987a, 1991a), la même question se pose. Les talus des haies «contemporaines» sont-ils érigés de la même manière que ceux des haies «modernes» et «médiévales». Les haies qu'il a considérées comme «modernes» et «médiévales» sont généralement des haies de bords de chemins contrairement aux haies «contemporaines». Les chemins font partie des plus anciennes limites parcellaires. Ainsi, l'ancienneté d'un chemin a souvent permis d'attribuer une datation ancienne aux haies adjacentes. Or les usages effectués sur une haie de plein champ ne sont pas exactement les mêmes que ceux opérés sur une haie bordant un chemin. La comparaison de fréquence réalisée sur le fragon peut signifier que ce dernier pousse moins sur les haies de plein champ, parce que construites ou entretenues différemment.

Le fragon ne serait ainsi pas forcément un indicateur d'ancienneté des lieux, mais un

indicateur de «qualité» des lieux. Sur les sept sondages de Pont-Calleck, des indices d'occupations ont systématiquement été trouvés. La perturbation des sols est ici clairement attestée. Cette dernière peut être nécessaire à *Ruscus* sans laquelle il ne peut se développer. La physico-chimie des sols et les conditions de drainage peuvent notamment être modifiées et favoriser la croissance du fragon. Son absence ailleurs est sûrement due à l'absence de ces éléments favorables. Son autécologie fine a hélas été peu étudiée. Pour vérifier une telle hypothèse, seules les analyses chimiques réalisées sur les échantillons de sol prélevés pourront apporter des éléments de réponse.

Concernant le millet (*Milium effusum*), il est intéressant de remarquer la ressemblance entre les structures des deux sondages où il est présent. Cette analogie structurelle peut être secondée par une analogie fonctionnelle. Ceci peut entraîner une physico-chimie des sols équivalente permettant la présence de *Milium effusum*.

7.5 Discussion générale

7.5.1 De l'observation de corrélations à la notion d'impact

Dans tous les cas observés, il existe une nette corrélation entre la flore et les structures archéologiques. Comme pour toute corrélation, ce lien peut avoir trois causes. La flore peut avoir un impact sur la répartition des structures ou le contraire. Un facteur extérieur autre peut avoir un impact sur la distribution des structures et de la flore.

L'homme ne s'implante pas n'importe où dans son environnement végétal. Il va préférer s'installer dans un lieu où sont disponibles les espèces végétales dont il a besoin pour un type d'activité. La répartition des espèces végétales peut ainsi avoir un impact sur l'implantation de structures humaines. Toutefois cet impact n'existe qu'à l'échelle du paysage. Les échelles auxquelles ont été observées nos corrélations sont beaucoup plus fines. Elles se situent au niveau du site et des structures. L'implantation des structures a nécessité une mise à nu du sol et a forcément enlevé la végétation préexistante. La végétation actuelle a obligatoirement colonisé les structures après leur création voire leur abandon. La végétation ne peut donc avoir d'influence sur les structures puisqu'elle ne s'est implantée que plus tardivement. Il n'est donc pas concevable d'envisager que les corrélations observées soient la résultante d'un impact de la végétation sur les structures.

L'environnement physique peut aussi avoir un impact double sur la flore et l'implantation humaine. Le climat, le relief, la géologie, l'hydrographie sont des facteurs bien connus pour d'influence sur la répartition de la flore mais aussi sur les installations humaines. Il existe aussi bien une écologie des plantes qu'une écologie humaine. Cependant, à l'échelle de nos études, l'environnement physique varie peu. La flore étant un intégrateur direct du sol, ces micro-variations locales peuvent avoir une influence sur la répartition des espèces végétales. En revanche, l'homme a une vision de l'environnement physique à l'échelle paysagère. Il ne s'intéresse que peu aux micro-variations locales de ce dernier. Celles-ci ne sont pas un frein à ces activités. Il est donc possible d'éliminer l'hypothèse que les corrélations observées soient la résultante d'un impact double de l'environnement physique sur la végétation ainsi que sur les structures.

Il ne reste ainsi plus comme hypothèse que ce sont les structures et les activités humaines passées qui ont un impact sur la flore. La fouille illustre bien que celles-ci sont très variables au sein d'un site. La variation locale de ces structures peut donc facilement expliquer des variations locales de la flore. Ces échelles de variation sont compatibles. Les structures et usages passés sont antérieurs à l'implantation de la flore. Il est donc possible d'affirmer que ce sont les structures qui ont un impact sur la répartition des espèces végétales car c'est la seule hypothèse valable. A l'échelle du paysage, il avait été impossible au cours du DEA de mettre en évidence cet impact.

Cet impact peut être direct ou indirect. Il peut être direct si c'est l'homme qui a implanté les végétaux sur les structures. Il a aussi de grandes chances d'être indirect. Les structures peuvent avoir modifié l'environnement et l'écosystème dans son ensemble. La modification de répartition des espèces végétales sur les structures ne serait ainsi que la manifestation d'un impact plus global des structures sur l'écosystème.

7.5.2 Impact différentiel des structures sur la flore

Cet impact des structures sur la flore n'est pas homogène. Toutes les espèces ne réagissent pas de la même façon. Chacune intègre l'impact des structures différemment. Pour tous les sites étudiés, certaines espèces sont plus fréquentes ou abondantes sur ou à proximité des structures. Pour d'autres espèces, c'est le contraire. Il est possible de dire que les structures ont un double impact sur la flore. Cet impact se traduit par l'apparition de nouvelles espèces sur les structures ou une augmentation de fréquence de certaines espèces présentes. Cet impact entraîne aussi la disparition ou la raréfaction de certaines espèces. Il y a ainsi un remplacement d'une flore par une autre sur les structures. Les structures sont caractérisées par une association végétale différente de l'association « naturelle » environnante.

En fonction de la nature des structures, la flore diffère aussi. A Groix, les structures en creux sont caractérisées par une végétation différente des structures en élévation. La typologie des structures est donc importante. Chaque structure est caractérisée par des espèces particulières. De la même manière, il existe un impact différentiel lié à la typologie des aires d'activité. Au Goënidou, la flore des bâtiments diffère de celles des structures agraires. Sur le site de Visseiche, la différence de végétation entre l'est et l'ouest de l'enclos peut être le résultat de telles différences d'activités. Chaque type de structure ou type d'activité héberge des associations végétales singulières.

Toutefois, des structures archéologiques différentes peuvent aussi être caractérisées par une flore similaire. Pour le cas du fragon, en forêt de Pont-Calleck, il y a systématiquement des structures sous-jacentes mais assez différentes. Cette espèce semble aussi indicatrice de la présence sous-jacente de l'enclos à Visseiche, alors qu'il s'agit d'un contexte archéologique différent. Il avait aussi été repéré sur des sites métallurgiques, sur un ancien cimetière à Comblessac et dans des dolmens à Groix et aux Glénans (Cf. Chapitre 3). Sur chacune, le fragon est présent alors qu'il est absent ailleurs et que ces structures sont de nature différente. On peut dans ce cas parler d'analogie phytoarchéologique entre ces structures.

7.5.3 Impact indirect des structures sur la flore : interactions entre espèces végétales

L'analyse de l'ensemble de la flore sur les sites du Goënidou et de Kervédan met en évidence des phénomènes de compétition interspécifique. Les espèces dominantes s'excluent souvent mutuellement. La présence des espèces accompagnatrices est souvent influencée par la dynamique de ces espèces dominantes. La présence d'une espèce à un endroit peut être liée à l'absence ou le recouvrement moindre d'une espèce dominante. Ces espèces dominantes ne sont pas indifférentes aux structures. Les autres espèces peuvent devoir leur répartition particulière vis-à-vis des structures à ces phénomènes de compétition interspécifique. Les structures ont de ce fait un impact indirect sur la distribution de certaines espèces. Il est difficile d'isoler l'impact direct des structures sur la flore. Cet impact direct ne peut facilement être décerné que pour les espèces dominantes. Les interactions entre espèces brouillent cet impact primaire.

Les mêmes phénomènes de compétition peuvent aussi exister sur les autres sites étudiés. L'absence d'étude sur l'ensemble des espèces pour ces sites n'a pas permis de mettre en évidence ce phénomène. Il est toutefois essentiel de le prendre en compte. Ainsi à Visseiche par exemple, les espèces en fourrés que sont le genêt, le merisier et le prunellier semblent s'exclure mutuellement. Le chêne qui fuit les fossés semble aussi fuir les zones de fourrés de merisier. En revanche, il semble bien tolérer les fourrés de prunellier. A Pont-Calleck, l'absence d'étude des espèces autres que le fragon ne permet pas de discerner ce phénomène. Il peut toutefois jouer un rôle important.

7.5.4 Validité des résultats aux différentes échelles

Toutes ces études portent sur le même type d'objet : un site et ses structures. Toutefois ces études ont été réalisées à des échelles différentes. Pour Kervédan, l'analyse de *Daucus carota* a été réalisée suivant une maille carrée très fine de 6.25 centimètres. L'analyse de l'ensemble de la végétation de ce site a été effectuée à une maille plus lâche de 0,5 m de coté. Pour Le Goënidou, le maillage utilisé était de 2.5m de coté. Quelle que soit l'échelle utilisée, des corrélations ont pu être observées entre les structures et la flore.

A Kervédan, la cartographie fine de la carotte mais aussi *a priori* des autres espèces permet de déterminer la présence de structures et leur limites. La limite des structures est nettement visible dans la végétation. Rien qu'en regardant la végétation, il est possible de déterminer l'emplacement et la forme des structures en creux.

Toujours pour le site de Kervédan, l'observation des différences de composition du tapis herbacé sur les relevés réalisés révèle la présence de structures. La maille plus lâche utilisée pour les relevés ne permet toutefois plus de déterminer précisément les contours nets de ces structures.

Pour le site du Goënidou, l'observation de la composition végétale des relevés permet aussi de révéler la présence de structures. Cependant, seules les macrostructures sont visibles. Il est ainsi possible de voir l'emplacement des bâtiments mais pas celui des murs les composant. A cette échelle, l'analyse des cartes de végétation renseigne plus sur les différentes zones

d'activité que sur les structures elles-mêmes. Il est ainsi possible de distinguer les zones d'activité domestiques et agraires présumées par rapport aux zones vierges de structures.

En fonction de l'échelle d'étude de la végétation utilisée, il est donc net que l'échelle de perception des sites archéologiques varie. En extrapolant, on peut imaginer que seules les différences entre « site » et « hors site » seraient visibles dans la végétation pour des tailles de relevés supérieures.

Cet impact est aussi visible aux différentes échelles de temps. Pour les occupations médiévales de La Montagne, du Goënidou et de Pont-Calleck, cinq siècle environ après la désertion des sites, cet impact est encore visible dans la végétation. A Kervédan, même plus de deux millénaires après cet abandon, l'occupation a encore une nette influence sur la flore. Il est possible d'affirmer que cet impact est durable sur du très long terme.

7.5.5 Validité des résultats pour les différents milieux végétaux

Les études réalisées ont été effectuées dans des milieux différents. Dans chacune des études, des corrélations ont été observées entre la flore et les vestiges archéologiques. Il y a donc récurrence de l'impact des structures sur la flore indépendamment des milieux végétaux étudiés.

Pour l'éperon barré de Kervédan, le milieu végétal étudié est une pelouse littorale donc un milieu très ouvert. L'habitat déserté du Goënidou est pour sa part actuellement couvert par une lande à fougères. Il est ainsi situé dans un milieu semi-ouvert. L'enclos de La Montagne est recoupé par une haie. Cette haie étudiée est un milieu arbustif, donc a priori fermé mais situé au sein d'un milieu ouvert. Les habitats désertés de Pont-Calleck sont actuellement en forêt. Le milieu est donc nettement fermé.

La perception des structures par l'observation de la flore semble modifiée en fonction de la fermeture du milieu. En milieu ouvert comme à Kervédan, la végétation permet de repérer facilement les structures, leurs contours et leur forme. Pour le site du Goënidou, en milieu semi-ouvert, la perception du site dans la végétation se fait au niveau des zones d'activité et non plus des structures. A La Montagne, l'étude de la flore arbustive indique seulement la présence de l'enclos et de ses fossés. La fouille systématique en forêt de Pont-Calleck des pieds de fragon a permis de révéler la présence systématique de structures enfouies. Cependant, la limite du fragon en surface ne semble pas coïncider avec une quelconque limite de structures archéologiques sous-jacentes. Il indique la présence d'une activité humaine ancienne mais son absence un mètre plus loin ne signifie pas l'absence de cette activité.

Il semble qu'il y ait des niveaux d'intégration différents de l'impact des structures sur la flore en fonction de la fermeture du milieu. Pour un milieu ouvert, il y a une intégration directe et nette de cet impact. En milieu fermé, l'impact est aussi présent mais semble moins marqué ou plus diffus. Cette différence est sûrement due aux phénomènes de compétition entre végétaux.

En milieu ouvert, il n'y a que des espèces herbacées de faibles tailles. Un pied d'une espèce ne fait que peu d'ombre à ses voisins. Il y a peu de compétition pour la lumière. De la lumière parvient donc à chaque endroit du sol. Le développement est propice partout. Il y a très peu de sol à nu. Cette prolifération et la faible taille des individus rend l'image de

l'impact des structures sur la végétation très nette.

Par opposition, en forêt, la compétition pour la lumière est très forte. Peu de lumière arrive au sol. Certains endroits non propices du fait d'une trop faible luminosité ne sont ainsi pas colonisés. L'espace vital des individus est aussi plus élevé du fait de leur grande taille. Il y a donc nettement plus de sol à nu. Ce phénomène est sans aucun doute à l'origine de cette moins bonne intégration de l'impact des structures sur la végétation.

En fonction de la fermeture du milieu, l'échelle d'étude de la végétation varie mais aussi le degré d'intégration des sites archéologiques par cette végétation. Il est indispensable à l'avenir de ne pas oublier ce facteur lors de la réalisation d'une analyse phytoarchéologique. Il est aussi essentiel de prendre en compte ces différentes échelles d'intégration en prospection aérienne. Les prospecteurs ne doivent pas négliger que la nature du milieu végétal influe sur l'image des vestiges. Il faudra franchir le pas de la détection de structures à la détection d'aires d'activité dans les milieux fermés et semi-fermés. Une lecture différente du paysage sera nécessaire pour la détection des vestiges dans ces milieux.

Conclusion

Tous les sites étudiés montrent des particularismes de flore liés à la présence des structures archéologiques. Au vu des échelles locales d'étude, il est possible d'affirmer que les occupations anciennes ont un impact sur la répartition actuelle des espèces végétales. Certaines espèces poussent préférentiellement sur les structures et d'autres en dehors. Cet impact se traduit par des modifications de recouvrements et de fréquences d'occurrences des espèces. Le rôle de la typologie est important. Les différentes structures ou aires d'activité hébergent des espèces particulières.

L'impact des occupations archéologiques sur la flore peut être plus ou moins direct. Il est direct dans le cas d'introduction d'espèces. Il est indirect lors d'adaptation des espèces à une modification globale de l'environnement. Les phénomènes de compétition entre plantes peuvent rendre encore plus indirect cet impact. Certaines espèces dominantes ont une répartition calquée sur les structures. Elles peuvent influencer la répartition des autres espèces. Dans ce cas, ces dernières ont aussi une répartition particulière vis-à-vis des structures. Il est difficile de distinguer ces différents types d'impact.

Cette influence des occupations anciennes sur la nature de la flore a pu être discernée quels que soient l'échelle, le milieu d'étude et le type de site archéologique. La fermeture du milieu semble toutefois jouer un rôle important sur l'intégration de cet impact par la flore. Plus le milieu est fermé, moins les structures sont discernables dans la végétation. Seules les aires d'activité ou les sites peuvent alors être détectés.

Chapitre 8 Analyse de l'impact des occupations archéologiques sur la flore à travers la nature physico-chimique des sols

Un impact des occupations archéologiques sur la flore actuelle a été mis en évidence sur chaque site. Pour analyser la nature de cet impact, il est utile de s'intéresser à la physico-chimie des sols supportant cette végétation. Les activités passées ont pu modifier les propriétés des sols. Cette modification du milieu peut jouer un rôle sur la nature de la flore présente. Pour mettre en évidence ce phénomène, des analyses statistiques et spatiales sur les données archéologiques, pédologiques et floristiques sont effectuées. Le site de La Montagne n'ayant pas fait l'objet de prélèvements de sol n'est naturellement pas inclus dans cette partie de l'étude.

8.1 Variation latérale à l'échelle du site (Site du Goënidou)

8.1.1 Résultats

Pour le site du Goënidou, les prélèvements de sol ont systématiquement concerné l'horizon hémi-organique A1. L'analyse de ces données est donc une étude des variations latérales des propriétés physico-chimiques de cet horizon. Ceci passe par une analyse spatiale. La distance entre chaque prélèvement est de 2.5 mètres sur le site du Goënidou. La méthode de relevé archéologique par microtopographie ne permet qu'une interprétation générale des macrostructures. La variation latérale des propriétés physico-chimiques de l'horizon A1 ne peut être analysée qu'à l'échelle des aires d'activité. Cette analyse passe par la réalisation de cartes des différentes propriétés des sols mesurées sur lesquelles ont été reportés les relevés microtopographiques (annexe 13).

Afin de synthétiser ces résultats cartographiques, ces données ont été intégrées à l'analyse factorielle multiple (AFM) réalisée entre les abondances d'espèces et la présence/absence de structures (Cf. 7.2).

8.1.1.1 Interpolation des variables de physico-chimie des sols

Les prélèvements de sol de 164 relevés ont fait l'objet d'analyses. Les prélèvements ont été échantillonnés en quinconce. Les analyses concernent approximativement un relevé sur deux. Ces données sont consignées dans une matrice (fig. 75).

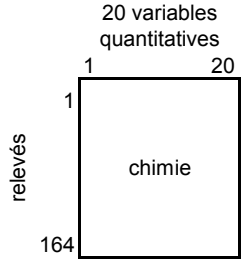


Figure 75 - Structure des données de physico-chimie des sols du site du Goënidou

L'AFM palie normalement l'absence de données qualitatives en renvoyant la valeur moyenne des variables étudiées au niveau des valeurs manquantes. Le sous-échantillonnage est trop important pour se permettre d'intégrer directement cette matrice dans l'AFM. Il est nécessaire d'interpoler les données de physico-chimie des sols au niveau des relevés non mesurés. Les cartes montrent que deux prélèvements voisins ont une physico-chimie généralement plus proche que deux prélèvements distants. Il y a une autocorrélation spatiale positive : l'interpolation des données est possible. Chaque prélèvement non mesuré a un ou plusieurs voisins ayant fait l'objet d'analyses. L'interpolation au niveau d'un relevé non analysé est effectuée en faisant la moyenne des mesures effectuées sur ces relevés voisins. Chaque relevé de végétation se retrouve ainsi avec des valeurs pour chacune des variables de physico-chimie des sols. Même si ces valeurs ne sont pas totalement justes, elles peuvent toutefois être considérées comme proches de la réalité étant donné le faible écartement inter-prélèvement. Les mesures ne donnent qu'un aperçu de la physico-chimie au centre des relevés. Ces valeurs ne sont pas homogènes sur l'ensemble de la surface du relevé : il y a une variabilité spatiale intra-relevé. Les valeurs interpolées peuvent être considérées comme aussi justes que les valeurs mesurées au sens où elles intègrent cette fluctuation. Elles donnent une idée générale de la physico-chimie au sein d'un relevé au même titre que les valeurs mesurées.

Cette nouvelle matrice de physico-chimie des sols peut être intégrée à l'AFM comme groupe supplémentaire (fig. 76).

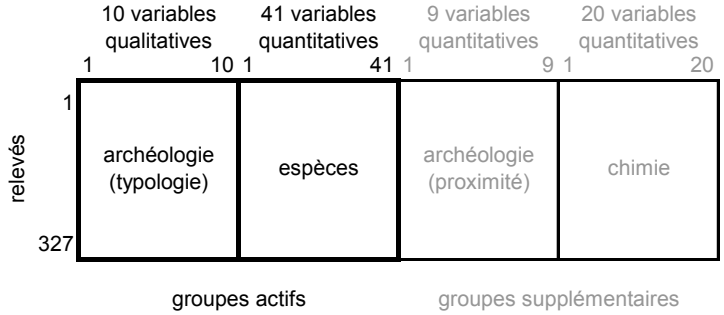


Figure 76 - AFM du Goënidou : structure des données utilisées pour l'analyse des propriétés physico-chimiques des sols

La physico-chimie n'étant ajoutée qu'en groupe supplémentaire, l'interprétation des axes de l'AFM correspond à celle du chapitre précédent (Cf. 7.2.1). Le premier facteur permet de distinguer une flore différente entre les relevés sur structures et les relevés hors structures. L'axe 2 affine cette analyse en distinguant une flore différente entre les activités agraires et domestiques. Ce rappel effectué, il est possible d'analyser le lien entre typologie des structures et végétation à travers la physico-chimie des sols.

8.1.1.2 Interprétation de l'AFM en termes de drainage

Les quatre variables physiques sont peu corrélées avec les deux premiers facteurs de l'AFM (fig. 77). Il y a peu de modifications de drainage au niveau des structures.

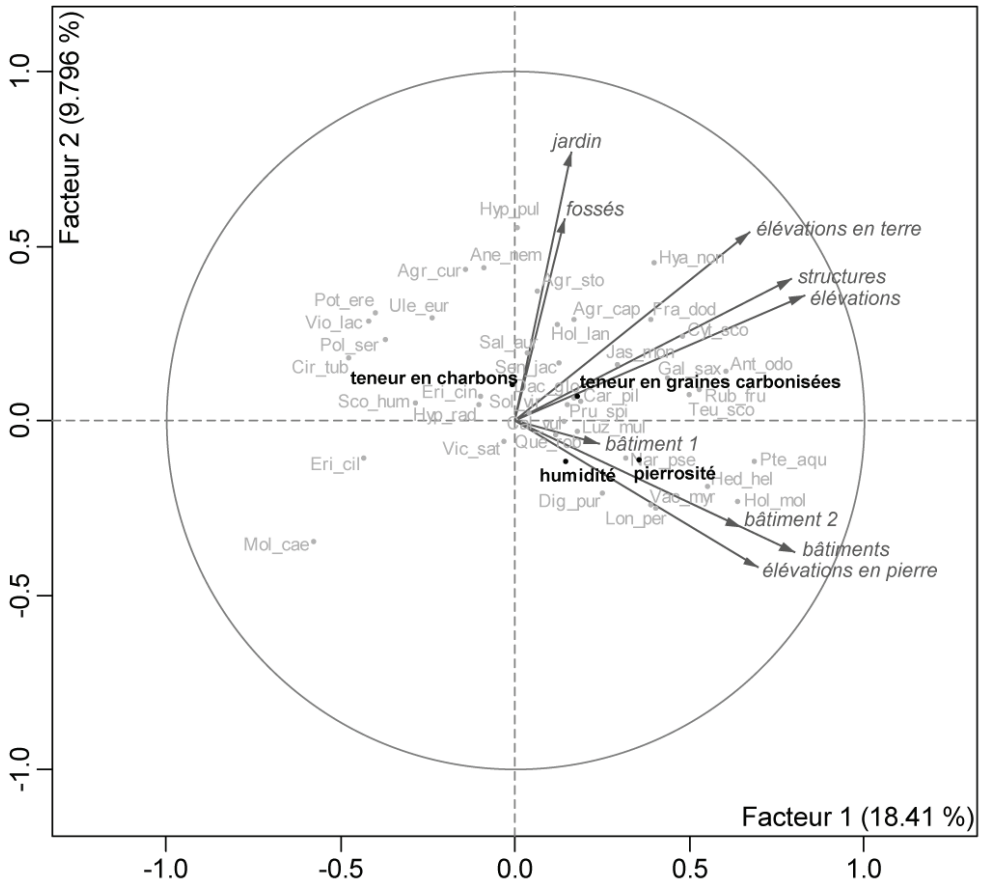


Figure 77 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés de drainage des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces

La variable la plus liée aux structures est le taux de pierrosité (éléments grossiers supérieurs à 2 mm). Il est plus élevé sur les structures, et plus particulièrement sur les bâtiments. Parmi les éléments grossiers, des charbons et des graines carbonisées ont été retrouvés. La teneur des prélèvements en charbons n'a pas un comportement particulièrement marqué. Elle semble très légèrement supérieure dans l'espace agraire. Pour les graines carbonisées, leur concentration est anecdotique. Peu de prélèvements en présentent. Toutefois, les prélèvements concernés sont quasi systématiquement au niveau de structures. Ceci explique l'existence d'un lien modéré avec les structures de manière générale. Ces graines sont essentiellement des graines de genêt (fig. 78). Il est possible que le genêt ait été utilisé pour la couverture des bâtiments. L'incendie éventuel de cette couverture pourrait expliquer les teneurs en graines légèrement plus élevées sur structures. Toutefois, le genêt est aussi présent actuellement. Il a tendance à être plus abondant sur les structures. La présence de ces graines carbonisées pourrait être simplement due à un entretien de la lande postérieure à l'abandon du site par des pratiques d'écobuage. Les graines de céréales (orge et seigle) sont aussi assez bien représentées. Leur origine archéologique ne laisse quant à elles aucun doute. Concernant le taux d'humidité, celui-ci apparaît légèrement plus élevé au niveau des bâtiments.

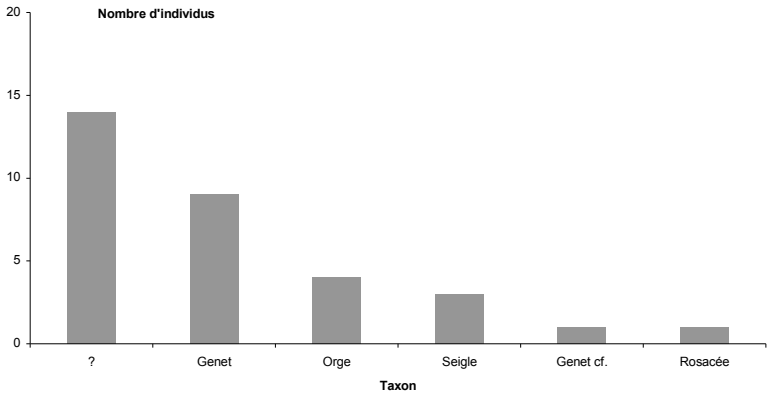


Figure 78 - spectre taxonomique des graines carbonisées trouvées dans les prélèvements de sol du Goënidou

Les taux d'humidité et de pierrosité sont plus importants sur les bâtiments, ils peuvent donc en partie expliquer les différences de flore repérées au niveau de ces derniers. Ces variables sont peu corrélées avec le premier plan factoriel. Chacune de ces variables est assez mal représentée par ce plan. Il est difficile d'émettre un lien direct entre la flore et ces variables. Il est toutefois bon de remarquer que le taux de pierrosité occupe la même place dans le plan factoriel que la jonquille *Narcissus pseudonarcissus*. Il est possible que la présence de cette espèce soit due à la présence d'un taux de pierrosité élevé.

8.1.1.3 Interprétation de l'AFM en termes d'acidité

Trois variables d'acidité sont analysées : l'acidité réelle (pH_{eau}), l'acidité potentielle (pH_{kcl}) et la différence entre les deux (ΔpH) (fig. 79).

Les trois variables d'acidité sont toutes assez bien corrélées avec le premier plan factoriel de l'AFM. L'acidité est donc assez fortement influencée par la présence de structures. Le facteur 1 distingue des relevés à pH_{kcl} élevés hors structures et des relevés à ΔpH élevés sur structures. Le pH_{kcl} semble plus élevé hors structures de manière générale. Le ΔpH voit ses valeurs accrues de manière spécifique à proximité des bâtiments. Le pH_{eau} n'est pas lié à l'axe 1. En revanche, il est assez bien corrélé avec le facteur 2 de l'analyse. Les zones d'activité agraire sont caractérisées par un pH_{eau} anormalement faible.

Ces variables d'acidité sont bien corrélées avec le premier plan factoriel. Chacune de ces variables est assez bien représentée par ce plan. Il est possible d'émettre des liens entre l'acidité et la flore. Le ΔpH plus élevé sur les bâtiments peut justifier la présence d'espèces particulières sur ces derniers comme la houlque molle *Holcus mollis*, le lierre *Hedera helix*, la myrtille *Vaccinium myrtillus* et le chèvrefeuille *Lonicera periclymenum*. Hors des bâtiments, la présence de ΔpH faibles peut en partie expliquer la plus forte abondance de la potentille *Potentilla erecta*, de la violette *Viola lactea*, de la polygale *Polygala serpyllifolia*, et du cirse *Cirsium tuberosum*. La présence de la bruyère ciliée *Erica ciliaris* hors structures semble être liée à un pH_{kcl} plus élevé. L'acidité potentielle plus élevée sur les structures peut justifier l'abondance plus forte de la flouve *Anthoxanthum odoratum*, du gaillet *Galium saxatile*, de la ronce *Rubus fruticosus* et de la germandrée *Teucrium scorodonia*. Les fortes valeurs de pH_{eau}

ne sont liées à aucune flore particulière. En revanche, au niveau de l'espace agraire, l'acidité réelle plus élevée semble assez liée à l'abondance du millepertuis *Hypericum pulchrum*, de l'anémone *Anemone nemorosa* et des agrostides *Agrostis capillaris* et *Agrostis curtisii*.

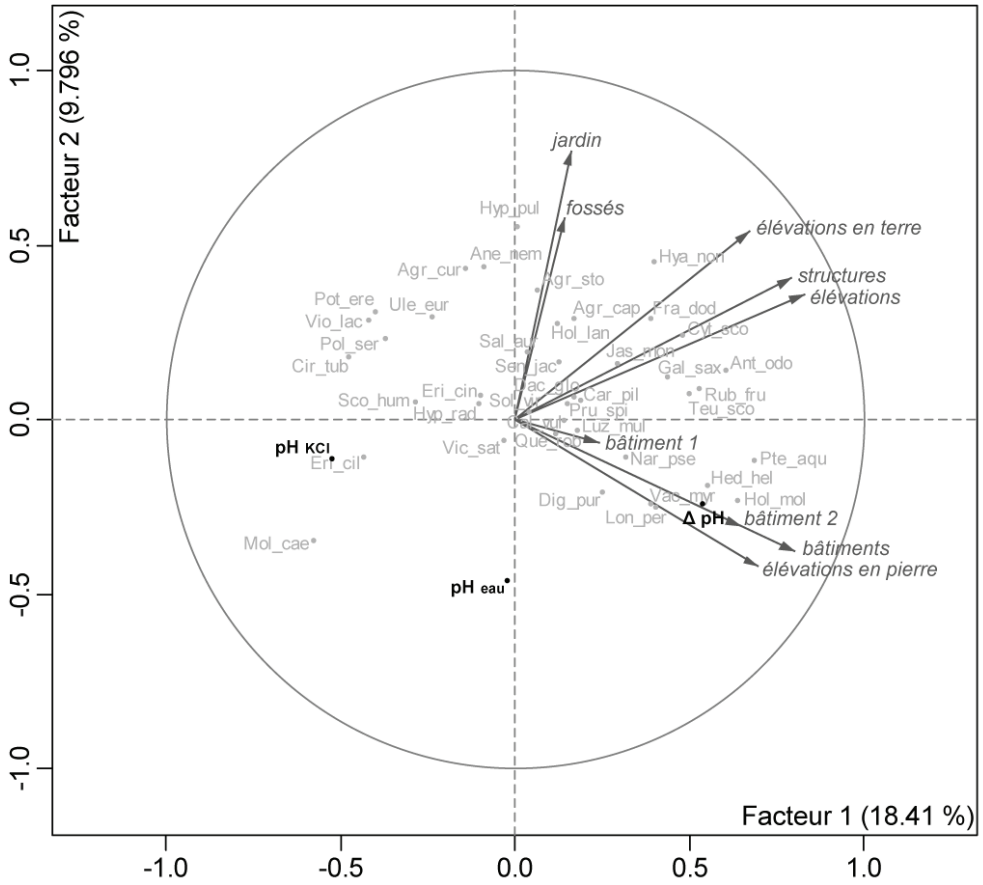


Figure 79 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés d'acidité des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces

8.1.1.4 Interprétation de l'AFM en termes de matière organique et de phosphore

L'horizon A1 analysé étant un horizon organo-minéral, il est nécessaire pour comprendre sa dynamique de s'intéresser à la matière organique. Les variables utilisées sont les teneurs en carbone (C) et azote (N), le rapport de ces teneurs (C/N) et le phosphore assimilable (P_2O_5). Pour analyser ces variables, celles-ci sont projetées sur le premier plan factoriel de l'AFM (fig. 80).

L'azote, le carbone et le phosphore sont peu liés au premier plan factoriel. Ils ont à peu près le même comportement. Tous les trois sont un peu plus concentrés sur les structures et notamment sur les bâtiments. Parmi ces trois éléments, le phosphore est le plus inféodé au plan 1-2. Les variations du rapport C/N sont mieux expliquées par ce premier plan factoriel. Ce rapport est relié aux deux axes. Il est généralement plus élevé hors structures. Il est surtout minoré sur les structures agraires.

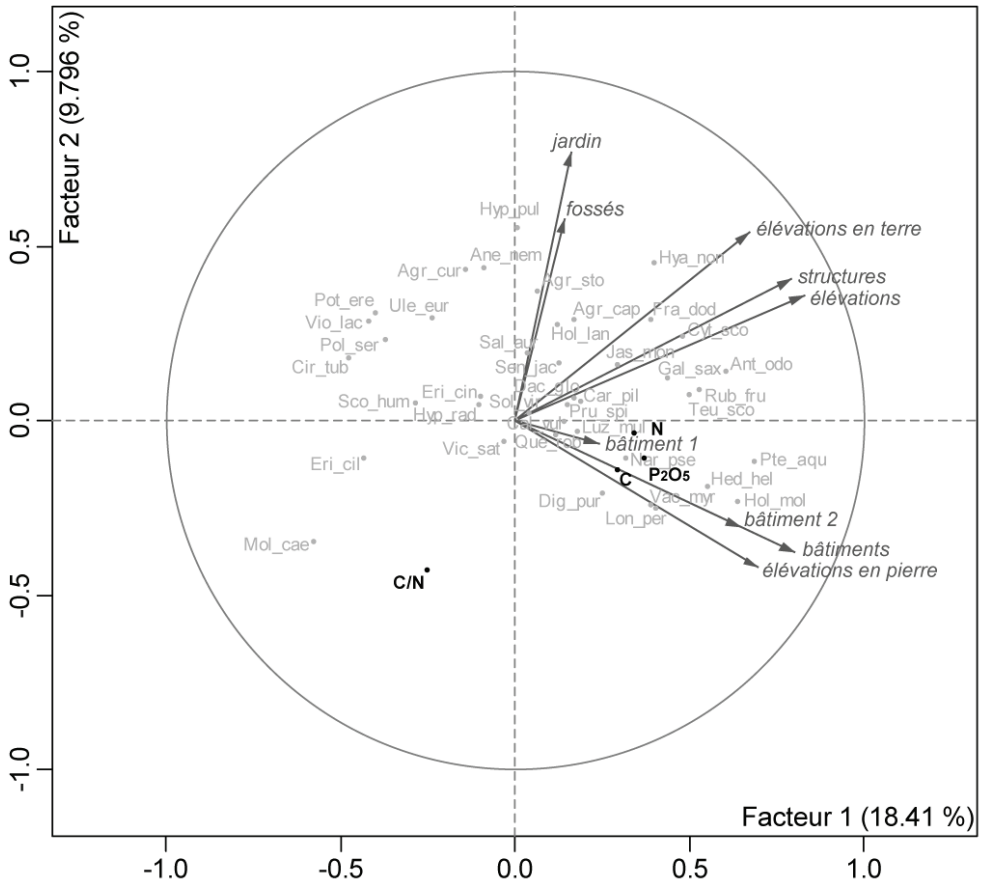


Figure 80 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés organiques des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces

Les taux de carbone, d'azote et de phosphore assimilable sont plus importants sur les bâtiments. Ils contribuent sûrement en partie à expliquer les différences de flore. Ces variables sont cependant mal décrites par ce plan factoriel. Il est donc dangereux de rapprocher la flore et ces variables. La jonquille *Narcissus pseudonarcissus* attire tout de même l'attention par sa place proche avec ces trois paramètres. La présence de cette espèce peut en partie être liée à ces concentrations élevées. Les rapports C/N élevés ne correspondent à aucune espèce particulière. En revanche, les rapports faibles peuvent partiellement être à l'origine de la présence sur les structures agraires de la jacinthe *Hyacinthoides non-scripta* et des agrostides *Agrostis capillaris* et *Agrostis stolonifera*.

8.1.1.5 Interprétation de l'AFM en termes de complexe absorbant

Le complexe d'échange cationique a été analysé en détail. La capacité du complexe à accueillir les cations a été mesurée ainsi que la proportion d'occupation de ce complexe par les différents cations majoritaires. Ces différentes mesures sont analysées à travers le rapport entre les structures archéologiques et la végétation (fig. 81).

La capacité d'échange cationique (CEC) apparaît très légèrement plus élevée sur les structures. Parmi les cations analysés, le cation majoritaire occupant ce complexe est

l'aluminium Al^{3+}. Il occupe à lui seul pour certains prélèvements jusqu'à 96% des charges du complexe. Sa concentration est nettement plus faible sur les structures et notamment sur les bâtiments où il peut n'occuper seulement que 9% de ces charges.

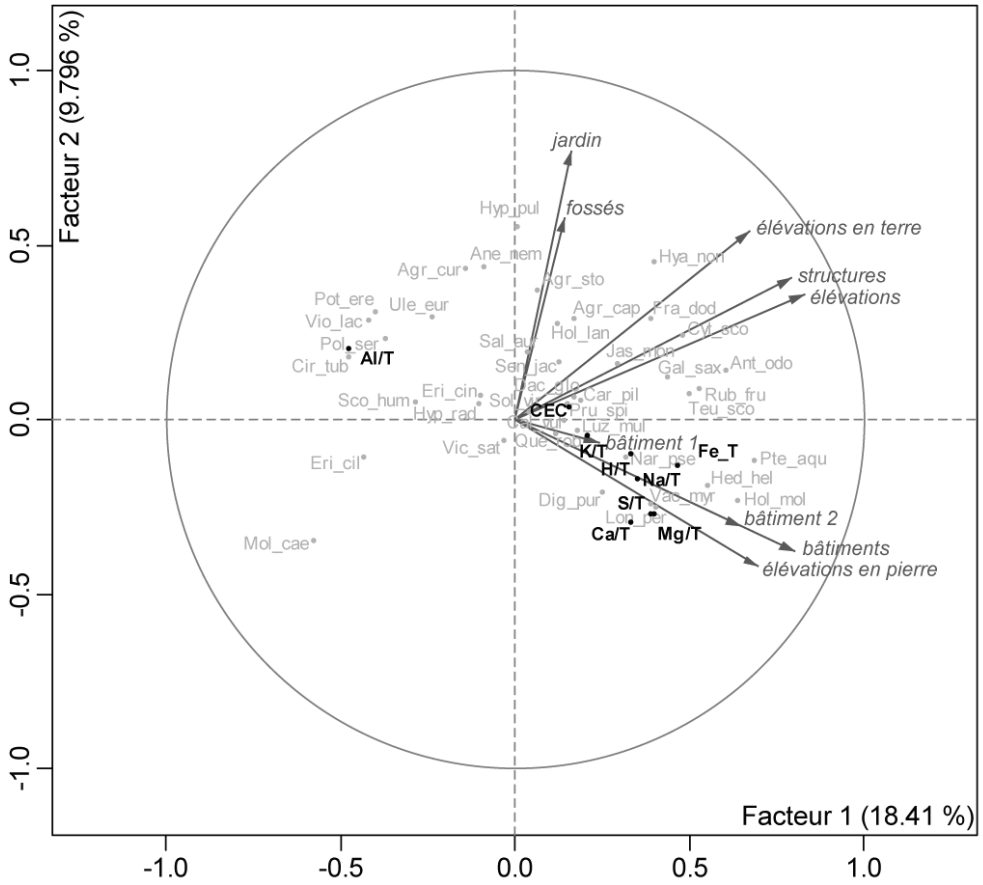


Figure 81 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés du complexe absorbant des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces

Cette nette différence fait que tous les autres cations analysés ont plus de charges disponibles sur les structures et notamment sur les bâtiments. Cette concentration plus élevée des autres cations sur les bâtiments est nettement visible. Les concentrations en sodium (Na), calcium (Ca) et magnésium (Mg) sont nettement corrélées à la proximité des bâtiments. C'est aussi le cas du potassium (K) mais en moins marqué. En conséquence, le taux de saturation en bases du complexe (S/T) est plus élevé sur les bâtiments. Le fer réagit lui aussi assez nettement à la présence de structures. Ces concentrations sont majorées sur les bâtiments.

Tous les cations analysés n'occupent pas la totalité des charges du complexe. Il reste des charges disponibles. Ces charges sont occupées par d'autres cations, en majorité par des protons (H^+). Le pourcentage restant de charges potentiellement occupées par ces protons a été calculé (H/T). Il est lui aussi plus élevé sur les bâtiments.

Cette différence de composition des ions occupant le complexe d'échange semble assez bien justifier les différences de flore entre les bâtiments et les zones sans bâtiments. Les fortes concentrations en Aluminium hors des bâtiments expliquent assez bien les abondances plus

fortes de la potentille *Potentilla erecta*, de la violette *Viola lactea*, de la polygale *Polygala serpyllifolia* et du cirse *Cirsium tuberosum*. La présence d'un taux de saturation en bases (S/T) plus élevé sur les bâtiments coïncide avec la présence des plantes inféodées à ces bâtiments et notamment la myrtille *Vaccinium myrtillus* et le chèvrefeuille *Lonicera periclymenum*. Parmi les cations dits basiques, le magnésium est le mieux corrélé à la présence de ces deux espèces. Les autres cations ont un rôle plus effacé. Ils sont tellement intercorrélés qu'il est difficile de différencier le rôle de chaque élément présent sur la flore.

8.1.2 Discussion

8.1.2.1 Doutes sur la fiabilité de certaines variables

L'analyse des cartes montre que pour certaines variables des motifs particuliers en bandes nord/sud apparaissent (annexe 13). C'est particulièrement le cas pour le pH_{eau},, le pH_{KCl} où les bandes les plus orientales montrent des valeurs nettement plus élevées. L'analyse du rapport C/N montre également ce même genre de bande nord/sud au niveau de la partie ouest du talus formant l'enceinte autour du bâtiment 2.

Les limites de la parcelle 110 sont orientées suivant cette même direction. De récents fauchages mécanisés ont été réalisés sur la parcelle. Les passages d'engins ont forcément dû perturber les sols[111]. Ces perturbations sont souvent parallèles aux limites de parcelles. Les usages récents d'entretien de la lande ont pu modifier les sols et créer ce genre de motif.

La présence de ces motifs peut aussi être liée au fait que les prélèvements de sol ont été réalisés par trois personnes. Hélas, le nom de l'individu ayant réalisé le prélèvement n'a pas été associé au prélèvement. L'ensemble d'une bande nord/sud a en général été échantillonné par un seul préleveur. Un biais lié au prélèvement pourrait donc exister. Même si la démarche était standardisée, il n'est pas à exclure que chaque individu l'ait adapté à sa manière. Certains ont pu prélever de manière privilégiée la partie supérieure ou profonde de l'horizon A1. Ces différences de profondeur d'échantillonnage peuvent avoir une forte influence sur les résultats d'analyses.

Les analyses ont, elles aussi, été réalisées suivant des séries en fonction de l'ordre de la numérotation des échantillons. Cette numérotation suit ces bandes nord/sud. Des erreurs de calibration peuvent donc aussi induire l'apparition de tels motifs en bandes.

Les valeurs des analyses chimiques ne sont donc pas forcément révélatrices d'une réalité pédologique. Il est préférable de tempérer les résultats des analyses en ayant un retour sur les données cartographiques (annexe 13).

8.1.2.2 Impact flagrant des bâtiments sur la physico-chimie des sols

L'insertion des variables de physico-chimie des sols dans l'AFM montre qu'il y a un net impact des structures sur le milieu. Cet impact se traduit par des différences de la majorité des caractéristiques des sols au niveau des structures.

[111] Lors de la réalisation du sondage archéologique au nord de la parcelle, un tractopelle avait aussi dû se frayer un chemin à travers la parcelle parallèlement au talus.

Les structures n'ont pas toutes le même impact sur le milieu. Les variables de physico-chimie des sols sont presque toutes corrélées avec la proximité aux bâtiments. Ils perturbent de manière drastique les propriétés des sols. Le drainage y est d'abord différent (fig. 77). Les sols sont plus humides et plus pierreux. L'acidité y est aussi modifiée (fig. 79). Le ΔpH y est plus élevé. De même, la matière organique y est plus concentrée (fig. 80). Les teneurs en carbone, azote et phosphore y sont supérieures. La capacité d'échange cationique ne semble que peu influencée par la présence de bâtiments (fig. 81). Toutefois, les proportions de tous les ions occupant ce complexe absorbant sont dictées par la présence de bâtiments. Hors bâtiments, l'aluminium a une place nettement plus importante. Par conséquent, tous les autres cations occupent une plus forte proportion du complexe d'échange au niveau des zones bâties. L'analyse des cartes confirme pleinement ces résultats.

D'après l'AFM, quelques variables ne sont pas liées à la proximité aux bâtiments mais aux structures en général. C'est le cas du pH_{KCl} : l'acidité potentielle y est nettement plus forte (fig. 79). La capacité d'échange cationique est légèrement plus forte (fig. 81). Au niveau artéfacts, les teneurs en graines carbonisées sont légèrement plus élevées sur les structures (fig. 77). Enfin le rapport carbone/azote (C/N) y est plus faible (fig. 80). Ce rapport semble davantage lié à la proximité aux anciennes zones d'activité agraire (jardin). La dynamique des humus y est différente : le C/N est plus fort et par conséquent la minéralisation de l'azote plus rapide. L'acidité réelle y est aussi différente : le pH_{eau} est plus faible, ces zones sont plus acides (fig. 79). Les teneurs en charbon y sont très légèrement supérieures (fig. 77).

Toutes ces variables ne répondant pas aux bâtiments sont celles montrant le plus clairement des motifs en bandes (annexe 13). Au regard des cartes et en excluant ces motifs, il apparaît finalement que les variables d'acidité semblent quand-même assez liées aux bâtiments. Le pH_{eau} y est plus fort et le pH_{KCl} plus faible. Les capacités d'échange cationique élevées paraissent aussi plus spécialement élevées sur les bâtiments. Cela concerne cependant surtout le bâtiment 1. Les C/N bas semblent en revanche bien associés aux aires d'activité agraire.

Parmi toutes les variables, ce sont finalement les concentrations en charbons et graines qui sont les moins influencées par la présence de structures (fig. 77). Les volumes de terre prélevés sont faibles : les teneurs en éléments carbonisés sont très basses. La marge d'erreur sur ces valeurs est plus forte que pour les variables de physico-chimie. Ceci est sûrement à l'origine de cette moins bonne corrélation avec les structures.

8.1.2.3 Présence d'un gradient physico-chimique entre aires d'activité

Pour presque toutes les variables, un lien fort avec les bâtiments apparaît. L'analyse des cartes montre que dans presque tous les cas, il y a opposition entre zones d'activités domestique et diffuse (annexe 13). Les zones d'activité agraire représentent un stade intermédiaire. Il y a donc un gradient chimique entre zones d'activités diffuse, agraire et domestique. Seul le C/N ne suit pas ce schéma. Les rapports carbone/azote bas sont caractéristiques des zones d'activité agraire.

Plusieurs gradients sont superposés.

Il y a tout d'abord un gradient de concentration en matières organiques. Les teneurs en carbone et azote sont élevés sur les bâtiments. Les sols sont plus organiques. Cette matière organique associée aux argiles forme le complexe absorbant. Le sol a ainsi une capacité du complexe d'échange légèrement accrue.

Il y a ensuite un gradient de disponibilité des nutriments. Au niveau des bâtiments, le complexe d'échange est mieux fourni en cations majeurs (Ca, K, Mg, Na) que sur le reste de la parcelle. Le taux de saturation est plus élevé. Concernant les anions, le phosphore est également plus disponible. Il y a globalement un milieu de nature plus riche.

Enfin, il y a une toxicité graduelle due à l'acidité du sol. L'acidité réelle est plus faible sur zones bâties. L'Aluminium occupe une place nettement moindre du complexe d'échange. Il y a une acidité organique et une acidité minérale plus faible. Si l'aluminium occupe une place moins importante du complexe d'échange, la part potentiellement occupée par les protons est en revanche plus forte (H/T). Le pH_{KCl} est plus faible et le ΔpH plus fort. Cette acidité de réserve plus forte est explicable du fait de l'acidité minérale moindre. Il y a plus de place pour les protons au sein du complexe d'échange. L'aluminium est fortement toxique à hautes doses, il bloque le développement racinaire.

Les zones d'activité domestique sont ainsi caractérisées par un milieu plus organique, plus riche en nutriments et moins toxique du point de vue acidité minérale.

8.1.2.4 Rôle de la physico-chimie des sols dans l'impact des structures sur la flore

Il a été observé que la flore suivait aussi un même gradient allant des zones d'activité diffuse aux zones d'activité domestique. Cette coïncidence ne peut être fortuite : la pédochimie dicte la nature de la flore. Il est en revanche impossible d'isoler les facteurs à l'origine des différences de flore : toutes les propriétés physico-chimiques des sols sont liées.

Sur les bâtiments, la flore présente potentiellement une affinité pour les milieux organiques, riches en nutriments. Il est possible de proposer que ces espèces sont absentes ailleurs car elles ne trouvent pas suffisamment de nutriments essentiels à leur croissance. L'acidité est moins forte, la toxicité aluminique se fait moins ressentir : les espèces présentes sont probablement des espèces ne tolérant pas cette toxicité.

Au niveau des zones d'activité diffuse, la situation est inversée : le milieu est pauvre en matière organique et en nutriments. Les espèces présentes ont dû développer des mécanismes pour pouvoir faciliter la récupération de ces éléments essentiels. Le milieu est caractérisé par une très forte acidité : les teneurs en aluminium sont hautement toxiques. Les espèces présentes sont nécessairement adaptées : elles ont une capacité de résistance à ces toxicités.

Au niveau de l'espace agraire, les espèces ont des caractéristiques intermédiaires. Elles tolèrent des toxicités aluminiques modérées mais pas les milieux trop pauvres en nutriments. Le C/N plus faible indique une proportion relative en azote plus élevée et donc un milieu plus riche. Cet azote peut être sous forme ionique et donc assimilable. Les espèces des zones agraires sont peut-être exigeantes vis-à-vis de ce nutriment. Pour le vérifier, il faudrait réaliser des analyses d'azote plus poussées.

8.1.2.5 Causes possibles des modifications de physico-chimie des sols au niveau des structures

- ***Impact direct des occupations sur le milieu***

Les occupations ont modifié de manière durable le milieu : l'ensemble des propriétés des sols est affecté. Les modifications humaines sont souvent liées à des transferts de matériaux. Le gradient physico-chimique observé révèle ce transfert : il y a eu accumulation au niveau des zones d'occupation et en particulier au niveau des bâtiments.

Les différences de propriétés du sol au niveau des bâtiments peuvent être liées à l'apport de matériaux de construction exogènes. Pour les murs, des pierres ont été ramenées. Ces matériaux se sont altérés depuis l'abandon. Ce phénomène est incontestablement à l'origine de la hausse du taux de pierrosité. Au niveau de l'îlot d'habitat fouillé, aucun signe d'une toiture en dur n'a été décelé : la couverture des bâtiments de la parcelle d'étude a probablement aussi été réalisée avec des matières végétales. Leur dégradation après abandon a enrichi le sol en matières organiques et peut expliquer les taux de carbone et d'azote plus élevés. La matière organique stocke assez bien l'eau, cette rétention peut être à l'origine des taux d'humidité plus élevés. En s'altérant, tous ces matériaux minéraux comme végétaux libèrent des nutriments : phosphore et cations dits basiques. La présence de ces cations diminue l'acidification. Cette réduction d'acidité évite la libération d'aluminium par les argiles. En conséquence, l'acidité présente est plus liée aux protons libérés par la dégradation des matières végétales. Les phénomènes d'altération des matériaux de construction peuvent en partie expliquer la majorité des différences de sol observées au niveau des zones domestiques.

Si les matériaux de construction jouent sûrement un rôle, l'occupation longue du site a aussi modifié le milieu. Les bâtiments ont servi à héberger des hommes et du bétail. Les animaux domestiques sont un facteur primordial de transfert d'éléments. Dans les sociétés traditionnelles, la stabulation est fréquente. L'élevage de quelques bêtes ne permet pas de risquer la perte accidentelle d'un ou de plusieurs individus. Le bétail demande beaucoup de soins et la stabulation est une réponse pour limiter ces risques. Les animaux sont à l'abri. Dans le cas de maisons mixtes, ils participent même au chauffage de l'habitat. Ce système nécessite d'aller chercher du fourrage ailleurs et de le ramener au niveau des zones domestiques : il y a transfert de matière et accumulation dans les bâtiments sous forme de déjections. Ces dernières sont alors utilisées pour enrichir la terre. La fumure est effectuée au niveau des zones agraires. Cet usage se traduit par un enrichissement fort des sols de bâtiments et l'enrichissement relatif des zones de jardin : il peut justifier la présence du gradient de propriétés des sols observé qui ne pouvait être expliqué par la simple utilisation de matériaux de constructions. Le fumier est surtout concentré en carbone, azote, potassium et phosphore. Il apporte aussi d'autres éléments comme les cations dit basiques. L'enrichissement graduel de tous ces éléments peut être expliqué par ce phénomène. Les plus fortes concentrations en cations peuvent expliquer les différences d'acidité et de concentration en aluminium comme il a été vu précédemment.

Un autre phénomène peut contribuer au gradient observé. Dans ces habitats traditionnels, la place du feu est importante. Dans l'îlot fouillé, les zones d'habitats présentent un foyer central. Il sert aussi bien au réchauffement de l'atmosphère qu'à la cuisson des aliments. Il sert quotidiennement. Il est alimenté en bois fréquemment. Il y a transfert de matière en provenance des zones boisées. La combustion produit de nombreuses cendres. Elles sont très riches en minéraux basiques. Les allers et venues les dispersent dans la pièce. Les murs créent une barrière à leur dispersion. Il y a donc enrichissement sur l'ensemble du bâtiment et pas en dehors. Il est souvent nécessaire de curer le foyer de ces cendres. Elles servent souvent à engraisser les sols de jardin. La présence de graines de céréales carbonisées dans les zones agraines confirme l'existence d'une telle pratique. Toutes ces manipulations peuvent expliquer en partie le gradient chimique, du moins concernant la partie minérale.

- ***Impact indirect par modification de la flore***

La flore peut aussi jouer un rôle sur la physico-chimie des sols. Seules les espèces dominantes peuvent participer activement à ces modifications. La fougère aigle est l'espèce la plus à même de changer les propriétés du milieu. Ses rhizomes sont parfois présents à des profondeurs dépassant le mètre et les racines implantées sur ces derniers lui permettent de puiser l'eau et les nutriments des horizons inférieurs. Les frondes sont alimentées de cette manière. Tous les ans, elles meurent et créent une épaisse litière. En se décomposant, cette litière libère rapidement les nutriments à la surface. La fougère participe activement au *turnover* de ces éléments et réduit potentiellement l'acidité (Marrs & Watt, 2006). La fougère aime les zones un peu plus riches. Elle peut auto-entretenir des concentrations en nutriments plus élevées en ramenant en permanence les nutriments en surface et éviter leur lessivage. Ce phénomène peut en partie expliquer l'enrichissement relatif des sols sur les structures.

La présence d'une litière plus importante sur les bâtiments peut aussi expliquer la présence de sols plus organiques. Les teneurs en carbone et azote sont accrues. Cette matière organique conditionne la capacité du complexe d'échange. La CEC est logiquement plus forte.

Le C/N est plus faible au niveau de l'espace agraire. Ces valeurs sont caractéristiques de litières améliorantes. L'abondance moindre des espèces dominantes peut expliquer ce phénomène. Que ce soit pour la fougère, la houlque molle ou la molinie, la production végétale est abondante. L'accumulation de litière est donc plus forte aussi bien sur les zones d'activité diffuse, que domestique. Ces litières doivent contribuer au C/N plus élevé dans ces zones.

8.2 Variation latérale à l'échelle des structures (site de Kervédan)

8.2.1 Résultats

Comme pour Le Goënidou, le site de Kervédan a fait l'objet de prélèvements de sol uniquement pour l'horizon hémi-orgamique A1. L'étude porte donc sur les variations latérales des propriétés physico-chimiques de cet horizon via une analyse spatiale. Pour Kervédan,

chaque prélèvement de sol est seulement espacé de 0.5 mètres des autres. La fouille systématique des relevés de végétation a permis d'identifier clairement des structures ainsi que leurs limites. Ces deux facteurs font que l'étude de la variation latérale des propriétés physico-chimique de l'horizon A1 a été réalisée à l'échelle de ces structures.

Les cartes de variation des différentes propriétés des sols mesurées ont été dressées. Sur chacune, l'emplacement des structures détectées à la fouille a été indiqué (annexe 14). Ces résultats cartographiques ont été synthétisés statistiquement en intégrant ces données à l'analyse factorielle multiple (AFM).

8.2.1.1 Ajout de la physico-chimie comme groupe supplémentaire de l'AFM

Dans le cas du site de groix, tous les prélèvements de sol des relevés ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques. Il n'y a pas besoin de réaliser des interpolations. La matrice des mesures est directement intégrée à l'AFM (fig. 82)

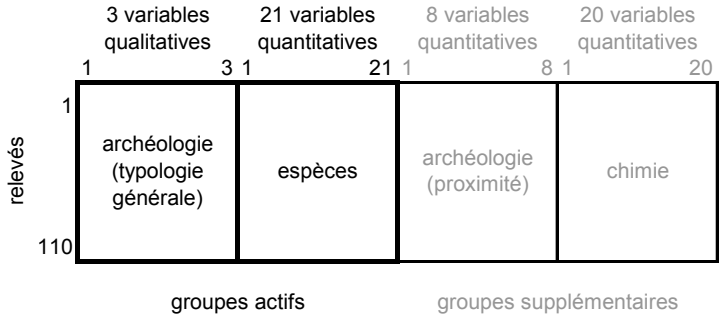


Figure 82 - AFM de Kervédan : structure des données utilisées utilisées pour l'analyse des propriétés physico-chimiques des sols

La physico-chimie est ajoutée comme groupe supplémentaire à l'analyse. L'interprétation globale de l'AFM est la même que dans le chapitre précédent (Cf. 7.3.1). Le premier facteur caractérise la présence/absence de structures en creux. L'axe 2 reflète un gradient est/ouest de la flore non lié aux structures. Ces précisions rappelées, il est possible d'analyser la nature de ces axes en termes de physico-chimie des sols.

8.2.1.2 Drainage

L'étude débute naturellement par la détermination du rôle des propriétés de drainage dans la signification des axes de l'AFM (fig. 83).

Les variables d'humidité et de pierrosité sont corrélées significativement avec les deux premiers axes de l'AFM.

Les zones de structures en creux sont caractérisées par un taux d'humidité supérieur et un taux de pierrosité inférieur. Les relevés les plus à l'ouest ont des taux de pierrosité et d'humidité plus élevés. Le taux d'humidité est assez bien corrélé avec la présence de structures en creux et beaucoup moins avec le gradient est/ouest. Le taux de pierrosité est lié de manière sensiblement égale avec les deux premiers axes.

Parmi les éléments grossiers (>2mm), quelques charbons ont été retrouvés. Ceux-ci sont essentiellement concentrés au niveau du sondage V. Aucune répartition particulière de

concentrations en fonction de la répartition des structures n'apparaît. Une graine carbonisée de genêt a aussi été retrouvée dans un des prélèvements du sondage II. Les teneurs en charbons et en graines carbonisées ne sont pas corrélées de manière significative avec le premier plan factoriel. Ces artéfacts ne sont pas assez fréquents pour qu'une tendance liée à la présence de structures en creux ou au gradient est/ouest ressorte.

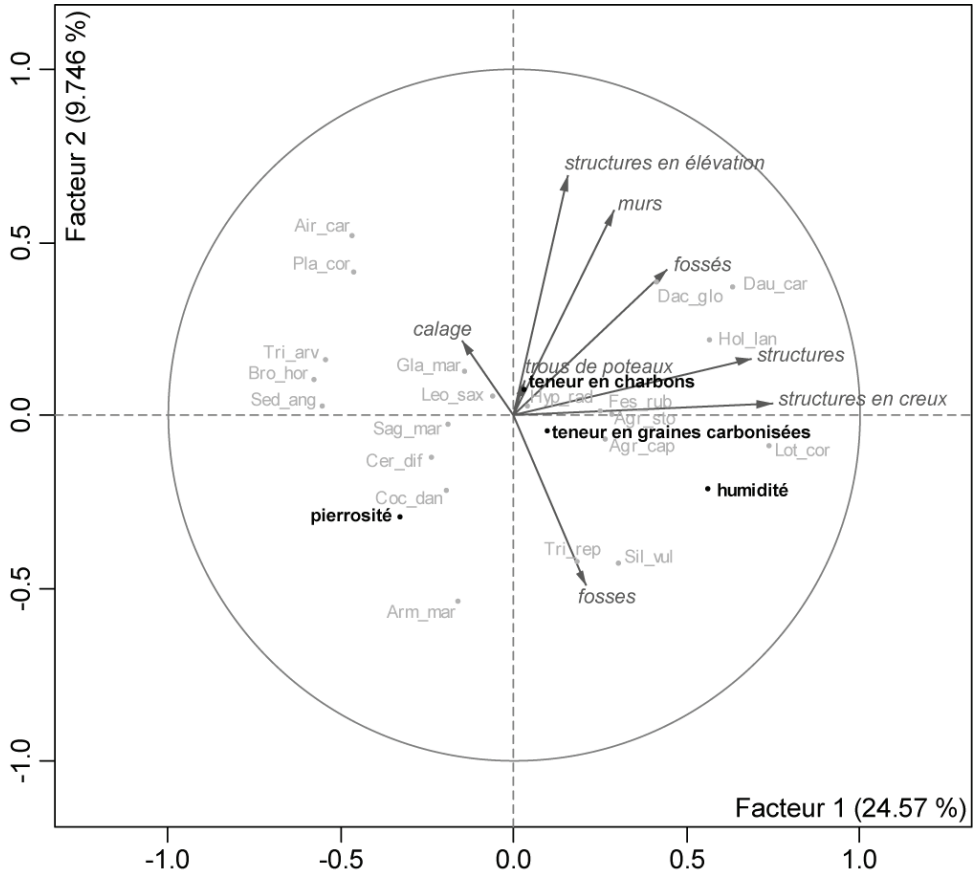


Figure 83 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés de drainage des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces

La présence d'un taux d'humidité plus élevé sur les structures en creux semble expliquer l'affinité du lotier *Lotus corniculatus* avec ces structures. La présence de la fétuque *Festuca rubra* et des agrostides *Agrostis stolonifera*, *Agrostis capilaris* sur les structures en creux peut aussi être due à cette humidité plus forte. Ce facteur permet aussi en partie d'expliquer l'absence de l'orpin *Sedum anglicum*, du brome *Bromus hordeaceus* subsp. *ferronii*, du trèfle des champs *Trifolium arvense*, du plantain *Plantago coronopus* et de la canche *Aira caryophyllea* sur ces structures.

La présence sur structures de la carotte *Daucus carota*, de la houlque laineuse *Holcus lanatus* et du dactyle *Dactylis glomerata* semble correspondre à la présence d'un taux de pierrosité plus faible. A l'opposé, les prélèvements caractérisés par les taux de pierrosité les plus forts semblent héberger des espèces comme le cranson *Cochlearia danica* ou le céraiste *Cerastium diffusum*.

8.2.1.3 Acidité

L'analyse se poursuit par la caractérisation des axes de l'AFM en termes d'acidité (fig. 84).

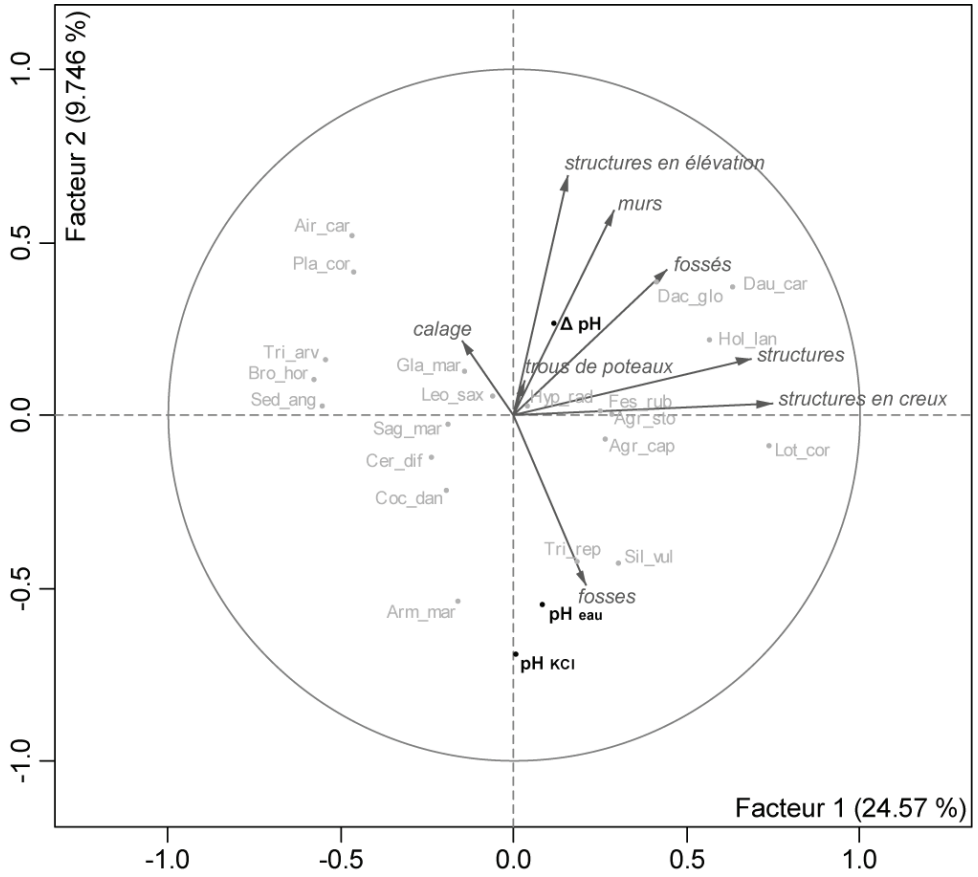


Figure 84 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés d'acidité des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces

Les trois variables d'acidité ne sont pas corrélées significativement avec le premier axe de l'AFM. En revanche, elles le sont avec le deuxième. Les pH_{eau} et pH_{KCl}, sont nettement liés à ce facteur. L'acidité réelle mais surtout potentielle est plus importante dans la zone ouest de l'éperon. Le ΔpH est moins bien corrélé avec l'axe 2. Il est plus élevé dans la zone est du site.

L'analyse des cartes de ces différents éléments confirme cette interprétation de l'AFM. Les pH_{eau} et pH_{KCl}, sont nettement plus élevés sur les sondages III et IV. Le ΔpH est globalement plus important au niveau des sondages I et II.

La présence de pH plus élevés sur la partie ouest de l'éperon semble assez bien expliquer la présence de l'Armérie *Armeria maritima*, du trèfle blanc *Trifolium repens* et du silène *Silene sulgaris* subsp. *maritima*.

8.2.1.4 Matière organique et phosphore

Le lien entre l'AFM avec les variables concernant la matière organique est ensuite analysé (fig. 85).

L'axe 1 de l'AFM est légèrement corrélé aux taux de carbone (C) et d'azote (N) des sols. Ces taux sont *a priori* légèrement plus faibles sur les structures en creux qu'en dehors.

L'analyse des cartes ne semble pas vraiment confirmer cette faible corrélation entre ces structures et les concentrations de ces éléments (annexe 14). Ces éléments semblent plus concentrés dans la partie ouest de l'éperon et seraient plus liés finalement à l'axe 2.

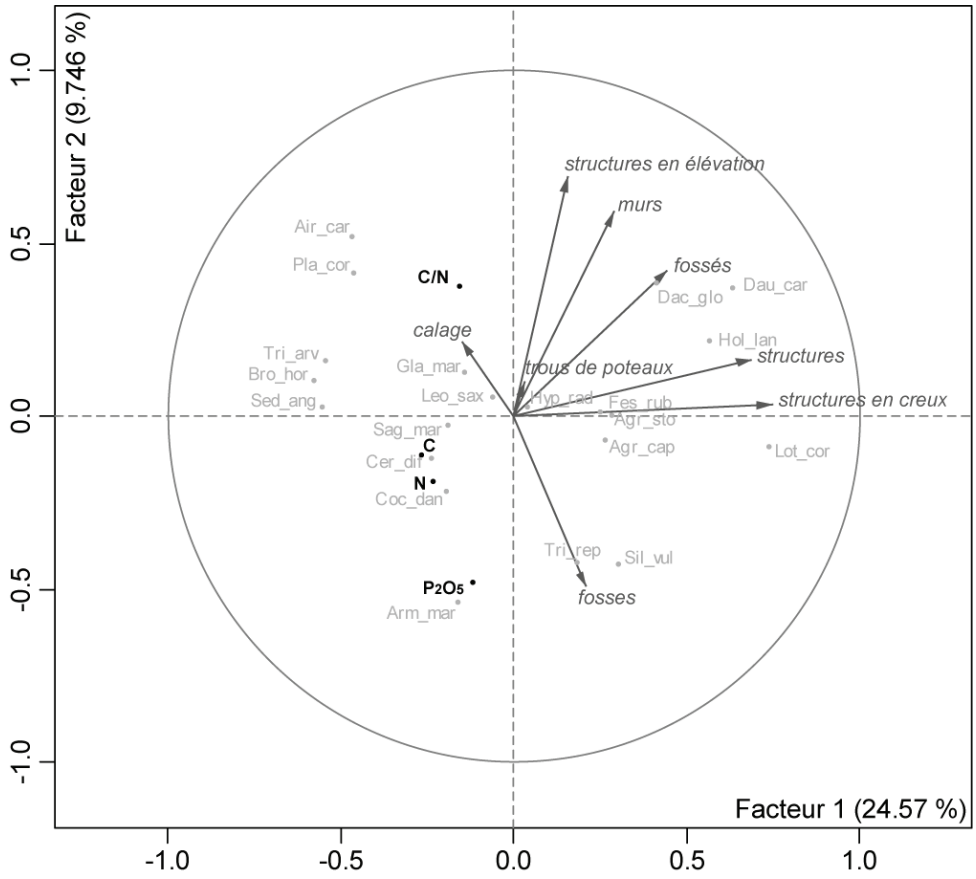


Figure 85 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés organiques des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces

Le rapport entre ces deux éléments (C/N) est lié à l'axe 2. Il est plus élevé dans la zone est de l'éperon. Le phosphore est lui aussi lié à ce deuxième facteur. Il est nettement plus élevé dans la partie ouest. Les cartes confirment cet enrichissement en phosphore au niveau des sondages III et IV. En revanche, elles permettent de nuancer les résultats concernant le C/N. Le rapport C/N est assez homogène sur l'ensemble des sondages.

Dans le plan factoriel, les taux de phosphore sont bien corrélés avec l'abondance de l'armérie *Armeria maritima*. Les abondances du céraiste *Cerastium diffusum* et du cranson *Cochlearia danica* occupent la même place que les concentrations en carbone (C) et en azote (N). Toutefois, ces éléments ne sont pas assez liés aux deux premiers axes pour en tirer un lien de cause à effet. Les faibles rapport C/N, quant à eux, semblent en partie expliquer la présence du trèfle blanc *Trifolium repens* et du silène *Silene sulgaris* subsp. *maritima* sur la fosse 2 du sondage IV. Les résultats cartographiques confirment ces liens (annexe 14).

8.2.1.5 Complexe absorbant

L'AFM est enfin étudiée à travers les contributions des variables concernant le complexe argilo-humique (fig. 86).

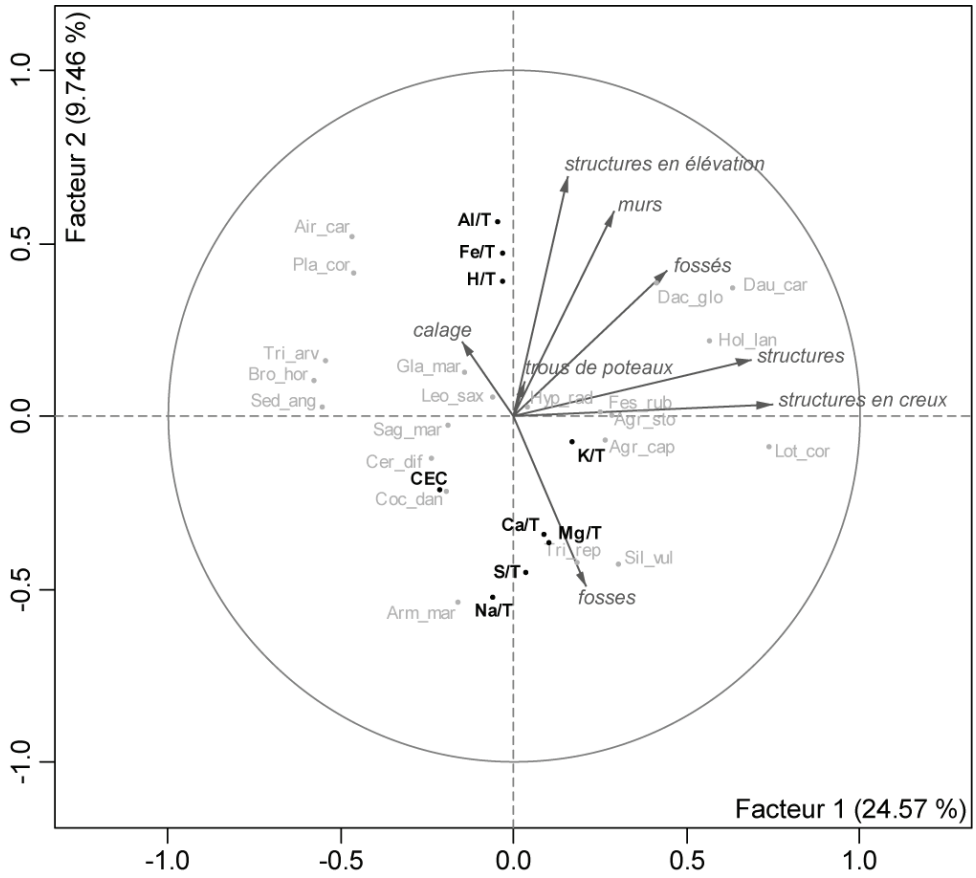


Figure 86 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés du complexe absorbant des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces

Mise à part la capacité du complexe d'échange cationique, aucune autre variable concernant le complexe n'est corrélée significativement avec le facteur 1. La corrélation entre la CEC et l'axe 1 est assez faible. La visualisation de cette variable sous forme de carte montre qu'elle ne semble pas vraiment liée à la présence de structures en creux (annexe 14). En revanche, un léger gradient est/ouest apparaît : la CEC est plus élevée sur le sondage III.

Les concentrations en sodium (Na), calcium (Ca) et magnésium (Mg) sont hautement liées à l'axe 2. Elles sont plus élevées sur la zone ouest de l'éperon. Le potassium n'est pas corrélé avec cet axe. En revanche, la somme de ces cations dits basiques est très fortement corrélée avec l'axe 2. Les cartes confirment que ces éléments sont bien représentés sur les sondages III et IV même pour le potassium (annexe 14).

Ce gradient est/ouest d'occupation du complexe par les bases échangeables entraîne une tendance inverse pour les cations restants (l'aluminium, le fer et les protons). Les proportions d'occupation du complexe par ces éléments sont donc nettement supérieures dans la partie est de l'éperon.

Le gradient est/ouest observé dans la flore semble dû aux proportions des cations occupant le complexe absorbant. Les espèces caractéristiques de la partie ouest comme l'armérie *Armeria maritima*, le trèfle blanc *Trifolium repens* ou encore le silène *Silene sulgaris* subsp. *maritima* semblent fortement liées à la présence de bases échangeables en proportions plus

fortes. L'armérie est plus liée au sodium alors que le trèfle blanc et le silène sont plus corrélés au calcium et au magnésium. Les zones à l'est ayant une plus faible concentration dans ces deux derniers éléments sont caractérisées par la canche *Aira caryophyllea* et le plantain *Plantago coronopus*. La CEC est associée dans le plan factoriel au cranson *Cochlearia danica*. A l'inverse, les zones ayant une CEC faible semblent accueillir des espèces comme la carotte *Daucus carota*, la houlque laineuse *Holcus lanatus* et le dactyle *Dactylis glomerata*.

8.2.2 Discussion

8.2.2.1 Nette modification de drainage au niveau des structures en creux

Pour le site de Kervédan, seules les propriétés de drainage sont modifiées au niveau des structures. Les sols y sont plus humides et moins pierreux (fig. 83). La quasi-totalité des structures sont des structures en creux : ce sont elles qui ont un impact sur ces propriétés de drainage. Les fosses, fossés et trous de poteaux sont tous caractérisés par un creusement de la roche mère. Dans le cas des fossés, ce creusement est long et linéaire. Pour les autres types de structure, il est ponctuel.

Ces creusements sont des zones d'accumulation de l'eau. Les sols de l'ensemble de l'éperon sont assez peu développés : ce sont des sols superficiels. Ils sont soumis à une forte déshydratation l'été. Au niveau des structures en creux, le sol est plus profond : la sécheresse estivale se fait moins sentir. Pendant les saisons pluvieuses, le comportement doit être inversé : les sols superficiels se gorgent rapidement en eau, la roche mère proche empêche tout phénomène d'infiltration. Les structures en creux permettent au contraire une redistribution de l'eau sur l'ensemble du profil de sol.

Les relevés sur trous de poteaux sont minoritaires (5 relevés). Le creusement de ces structures est secondairement rempli de pierres servant à bien caler les poteaux. La quasi totalité des relevés réalisés sur structures en creux sont sur fossés (21 relevés) et sur fosses (10 relevés). Pour ces deux types de structures, le creusement est rempli par un sédiment fin. Le matériau est clairement différent du substrat environnant. Les horizons superficiels héritent des caractéristiques du substrat. Pour cette raison, les relevés sur structures apparaissent caractérisés par un taux de pierrosité plus faible. Ce phénomène doit participer à la meilleure rétention d'eau des sols en été.

8.2.2.2 Présence d'un gradient physico-chimique est/ouest marqué

Toutes les autres propriétés de sols ne sont presque pas liées aux structures. Celles-ci n'ont qu'un impact limité sur la pédochimie. Les propriétés des sols sont majoritairement influencées par un gradient est/ouest.

A l'ouest de l'éperon, les sols sont plus riches en matière organique. Les taux de carbone, azote et surtout phosphore sont plus importants (fig. 85). A la fouille, il est apparu que les sondages III et IV avaient une très faible couverture sédimentaire au-dessus du substrat. Le sondage III en particulier est caractérisé par une quasi-absence de sol. Ce sont les sondages les plus à l'ouest. Ils sont donc plus exposés aux vents ainsi qu'à l'érosion. Au contraire, les

autres sondages, plus loin de la ligne de rivage, sont moins soumis aux éléments. Ce phénomène est clairement à mettre en rapport avec les différences physico-chimiques observées entre ces sondages et les autres. Il faut remarquer que sur ces sondages, hormis sur la fosse 2, les prélèvements ont en réalité été effectués sur l'horizon A0 et non pas l'horizon A1 du fait de l'absence de ce dernier. Les différences observées peuvent donc *a priori* être d'ordre stratigraphique. Pour le phosphore, les taux nettement plus élevés peuvent être dus à des pollutions récentes. Lors de la phase de terrain, il est apparu que l'ouest de l'éperon accueille fréquemment des goélands argentés. Ils pêchent en bas de falaise et viennent terminer leur repas sur l'éperon. La présence de roches affleurantes dans la partie ouest peut motiver le choix préférentiel de cette zone. Ils viennent y casser les coquilles de moules. De nombreux amas de coquilles peuvent y être aperçus. Ils peuvent aussi privilégier cette zone du fait d'une meilleure exposition aux vents. Le décollage y est plus aisé. Quelles qu'en soient les causes, les goélands enrichissent le milieu par leurs déjections, en étant plus fréquemment dans cette zone. Les fientes et les pelotes de réjection sont plus nombreuses. Ces pelotes contiennent de nombreuses arrêtes[112]. Tous ces éléments sont riches en phosphore et peuvent expliquer en grande partie les plus hautes teneurs observées. L'eau de mer est très peu concentrée en phosphore. L'apport de cet élément par les embruns est donc négligeable.

En revanche, l'eau de mer est très riche en cations dits basiques. Ces cations (Ca, K, Mg, Na) occupent une part importante du complexe d'échange de la zone occidentale (fig. 86). Tous ces éléments ont une répartition cartographique à peu près équivalente (annexe 14). Les cations majoritaires dans les sols sont le sodium et le magnésium et dans une moindre proportion le calcium. Le potassium occupe une part nettement moins importante de ce complexe. Dans l'eau de mer, le cation majoritaire est le sodium. Le magnésium est aussi bien représenté. La ressemblance avec la composition des sols est flagrante. L'enrichissement en bases de la partie ouest semble fortement dû à l'apport de cations par les embruns. Cet apport est particulièrement important pour les relevés les plus exposés. Pour certains prélèvements du sondage IV, le complexe est même parfois saturé par ces bases (S/T>100%).

Cette abondance de cations dits basiques entraîne une baisse d'acidité. Sur cette partie de l'éperon, les pH_{eau} et pH_{KCl} sont plus élevés (fig. 84). Le ΔpH est plus faible. Il y a un net gradient de pH. La place pour les cations acides au sein du complexe cationique est réduite. Les teneurs Al/T et Fe/T sont faibles (fig. 86). La place restante pour les protons aussi (H/T). Les teneurs en matière organique sont cependant plus fortes à l'ouest (fig. 85 et annexe 14). La décomposition de cette matière organique crée de l'acidité. L'acidification moindre ne peut être expliquée que par une meilleure capacité à neutraliser les acides (CNA). Les apports récurrents de cations avec les embruns neutralisent ces acides pourtant potentiellement plus présents.

Au contraire, dans la partie orientale du site, l'acidification est moins contenue. Cette acidité accélère la dégradation chimique des sols. Ils libèrent alors plus d'aluminium et de fer (fig. 86). Les sols légèrement plus profonds permettent un lessivage des cations basiques

[112] Notamment de très nombreuses mandibules de vieilles ont pu être observés en surface.

moins bien retenus par le complexe d'échange.

8.2.2.3 Adaptation de la flore aux différentes conditions

Face à toutes ces modifications du sol, la flore s'adapte. L'AFM révèle que le premier axe explicatif de la flore est la présence-absence de structure. Le gradient est/ouest de salinité n'intervient qu'en second lieu : la chimie des sols n'a donc qu'un impact secondaire dans les différences de flore observées. Les variations de flore sont surtout liées à des modifications du drainage. La salinité est pourtant un facteur majeur de variation de la flore. La majorité des espèces ne peuvent tolérer de fortes teneurs en sodium : cet élément est toxique à fortes concentrations. Cette moindre importance du gradient halin n'est valable que sur les données observées. Ce phénomène tient au fait du protocole d'échantillonnage. Il y a sensiblement autant de relevés sur les structures (41 relevés) que hors structures (69 relevés) : cette distribution permet de bien faire ressortir les différences de flore sur structures. Les relevés soumis à l'influence des embruns sont peu nombreux (24 relevés) : ils ne représentent qu'une faible information dans l'étude.

- ***Vis-à-vis de la présence de structure***

Les modifications de drainage expliquent en partie les différences de flore sur structures. Les différences d'humidité sont celles ayant le plus d'influence. Le taux d'humidité est la variable la mieux corrélée avec le premier facteur de l'AFM.

Les taux d'humidité élevés semblent particulièrement bien expliquer la présence du lotier *Lotus corniculatus* (fig. 83). Cette espèce pousse sur toutes les structures en creux. L'humidité du sol y est à chaque fois plus forte. Au niveau du sondage III, le lotier pousse aussi (annexe 7). Il n'y a pas de structures en creux mais une diaclase dans le substrat. Cette faille s'accompagne d'un taux d'humidité plus élevé (annexe 14). Au milieu du sondage II, un prélèvement est aussi plus humide. Là encore, le lotier est présent. L'humidité du sol semble le facteur explicatif déterminant la présence de cette espèce.

Toutes les autres espèces poussant préférentiellement sur les structures en creux peuvent aussi devoir leur présence aux modifications d'humidité (fig. 83). La fétuque *Festuca rubra* et les agrostides *Agrostis stolonifera*, *Agrostis capilaris* réagissent aussi à l'humidité du sol mais pas aussi bien que le lotier. Sur les structures, la houlque *Holcus lanatus*, la carotte *Daucus carota* et le dactyle *Dactylis glomerata* semblent plus préférer les sols moins pierreux des structures que les taux d'humidité plus élevés.

Hors structures, le même cas est observable. Certaines espèces ont une affinité pour les sols plus secs comme l'orpin *Sedum anglicum*, le brome *Bromus hordeaceus* subsp. *ferronii*, le trèfle des champs *Trifolium arvense*, le plantain *Plantago coronopus* et la canche *Aira caryophyllea*. D'autres espèces sont plus influencées par les sols pierreux comme le cranson *Cochlearia danica* ou le ceraiste *Cerastium diffusum*.

Les modifications d'humidité peuvent en partie être dues à la nature de la flore. Les espèces des structures comme le lotier ont un assez fort pouvoir de recouvrement l'été et protègent le sol de la dessiccation en créant un léger ombrage. Hors structures, il a été observé

la présence récurrente de sol nu. Dans ce cas, le sol est plus soumis à des variations d'hygrométrie. La nature des structures est amplement suffisante pour expliquer les différences d'humidité. Cette potentielle influence de la flore sur le sol est tout de même à prendre en considération. La pierrosité du sol ne peut, quant à elle, être modifiée par la flore.

- ***Vis-à-vis du gradient de salinité***

Le gradient chimique est/ouest observé explique aussi une partie des différences de flore observées. Beaucoup de variables sont corrélées. Il y a superposition de gradients d'acidité, de richesse du sol et de salinité. Au regard des fortes concentrations en sodium, il semble que ce soit la salinité qui ait une influence majeure sur la nature de la flore (fig. 86).

Dans l'ouest de l'éperon, les teneurs sont hautement toxiques pour la majorité des espèces. L'espèce observée ayant vraiment la meilleure tolérance est l'armérie *Armeria maritima*. Elle est réputée comme étant une espèce aérohaline[113]. Sa place dans l'analyse est nettement corrélée avec les teneurs en sodium. Quelques autres espèces semblent tolérer les taux de salinité élevés. C'est le cas du trèfle blanc *Trifolium repens* et du silène *Silene sulgaris* subsp. *maritima*. Ce silène est aussi réputé comme halophile. En revanche, le trèfle blanc n'est pas du tout indiqué comme tel. N'ayant eu que peu de spécimens, il y a peut-être eu une erreur de détermination. Ce serait peut-être plus le trèfle de l'ouest *Trifolium occidentale*, autrefois considéré comme sous-espèce du trèfle blanc. Cette espèce est en revanche clairement résistante aux embruns.

Dans la partie est de l'éperon, les espèces ne tolèrent pas les sols trop salés. Les espèces les plus remarquables sont la canche *Aira caryophyllea*, le plantain *Plantago coronopus*, le dactyle *Dactylis glomerata* et la carotte *Daucus carota*. Aucune de ces espèces n'est réellement caractéristique de l'ensemble des relevés de l'est de l'éperon. Toutes ces espèces sont influencées par la présence des structures.

8.3 Variation verticale (Site de Pont-Calleck)

8.3.1 Résultats

Pour le site de Pont-Calleck, les prélèvements de sol ont concerné tous les horizons rencontrés à la fouille. L'analyse de ces données est donc une étude des variations latérales mais aussi verticales des propriétés physico-chimiques du sol. Ceci passe donc par une analyse non plus spatiale mais une analyse de profils (annexe 15).

Afin de synthétiser l'information contenue dans ces profils, des tests de permutation ont été effectués (Cf. 6.6.2). Toutes les données n'ont pas pu être utilisées dans ces tests statistiques. Pour chaque profil partant du centre des pieds de fragon, seuls les prélèvements des horizons A0 et A1 à chaque extrémité, sous les pieds et hors pieds ont été sélectionnés. Tous les prélèvements concernant d'autres horizons où des milieux de profils n'ont pas été intégrés. Cette démarche ramène à 44 le nombre de prélèvements participant à l'analyse (11 profils).

[113] Espèce tolérante aux embruns.

- **Drainage**

Comme pour les autres sites, il est intéressant de commencer par analyser les variables physiques des sols. Cela passe avant tout par l'étude de la fraction grossière de ces sols (fig. 87).

	témoin		fragon	
A0	20.3±1.5		21.6±1.4	20.3±1
	*			**
A1	25±1.9		23.3±2	24.1±1.3
	22.6±1.3		22.4±1.2	

Figure 87 - Variations du taux de pierrosté (en % sur sol sec) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

Il n'apparaît pas de différences significatives de pierrosité entre les sols sous fragon et hors fragon, et ce quels que soient les horizons étudiés. En revanche, l'horizon A1 est plus pierreux que l'horizon A0. Ce fait est particulièrement marqué sous témoins. Parmi les éléments grossiers, des charbons ont pu être observés (fig. 88)

	témoin		fragon	
A0	0.39±0.15		0.6±0.31	0.39±0.11
	*			*
A1	0.7±0.24		0.65±0.27	0.68±0.17
	0.55±0.14		0.62±0.2	

Figure 88 - Variations de la teneur en charbons (en mg/kg de sol sec) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

Leurs concentrations sont sensiblement équivalentes entre sols sous fragon et sols sous témoins. En profondeur, au niveau de l'horizon A1, les concentrations apparaissent plus élevées en particulier sous témoins. Les charbons de bois ne sont pas les seuls éléments carbonisés trouvés. Il a été observé d'assez nombreuses graines (fig. 89).

Ce sont essentiellement des graines de céréales (orge, avoine). Dans un milieu forestier, leur origine archéologique ne fait aucun doute. Une bonne proportion de graines de Fabacées y est associée. Il y a une forte probabilité que les graines de Fabacées retrouvées aient aussi une origine archéologique. Il est probable qu'elles aient été carbonisées en même temps que les céréales. Dans ce cas, l'hypothèse d'espèces adventices est plausible. Les graines d'adventices sont souvent difficiles à séparer des graines cultivées lors de la récolte. L'observation d'une spore de champignon carbonisée renvoie à un éventuel stockage des graines. Souvent dans les silos mal ventilés, des moisissures se développent. La carbonisation

de toutes ces graines serait ainsi post-récolte. Il y a de fortes présomptions d'être en présence de ratés de cuisson. L'observation de fosses-dépotoir parmi les structures sondées confirme cette hypothèse. Ces graines ne sont pas réparties spatialement de manière homogène (fig. 90).

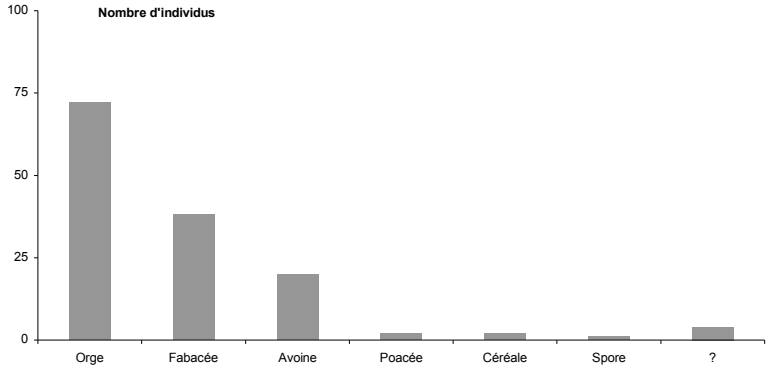


Figure 89 - Spectre taxonomique des graines carbonisées trouvées dans les prélèvements de sol de Pont-Calleck

	témoin		fragon	
A0	2.85±1.43	***	9.72±3.18	2.85±0.99
				*
A1	7.1±2.04		8.07±2.85	7.59±1.71
	4.98±1.3	*	8.89±2.09	

Figure 90 - Variations de la teneur en graines crarbonisées (en nb/kg de sol) sec entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ *: p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

Elles sont plus abondantes en profondeur. Au niveau des pieds de fragon, elles sont plus abondantes et notamment en surface. Ces différences granulométriques sont associées à des différences d'humidité (fig. 91).

	témoin		fragon	
A0	40.2±1.4		38±0.7	40.2±1
	**		**	***
A1	32.3±0.9		32.3±1	32.3±0.7
	36.2±1.2		35.1±0.9	

Figure 91 - Variations du taux d'humidité (en % sur sol humide) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ *: p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

L'humidité est nettement plus élevée en surface. En revanche, aucune différence notable n'est visible entre prélèvements sous fragon et sous témoins.

- **Acidité**

L'analyse peut aussi s'effectuer en terme d'acidité. L'acidité réelle est abordée à travers les mesures de pH_{eau} (fig. 92).

	témoin		fragon	
A0	3.69±0.04	*	3.82±0.06	3.69±0.03
	***		***	***
A1	4.01±0.05	***	4.09±0.05	4.05±0.03
	3.85±0.05	**	3.95±0.05	

Figure 92 - Variations du pH_{eau} entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

De manière générale, il apparaît que les sols sont très acides. Le pH_{eau} apparaît plus élevé en profondeur. L'acidité est plus forte en surface. Sous fragon, l'acidité est moins forte au niveau de l'horizon A0 comme au niveau de l'horizon A1. L'acidité peut aussi être abordée par l'étude du pH_{KCl} (fig. 93).

	témoin		fragon	
A0	3.19±0.06	+	3.3±0.06	3.19±0.04
	***		***	***
A1	3.68±0.04	***	3.81±0.04	3.75±0.03
	3.44±0.06	**	3.55±0.07	

Figure 93 - Variations du pH_{KCl} entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

L'acidité potentielle se comporte de la même manière que l'acidité réelle. De la même manière que pour le pH_{eau}, le pH_{KCl} est plus élevé en profondeur et sous fragon. Même si ces deux pH varient de la même manière, la différence entre les deux n'en est pas pour autant stable (fig. 94).

	témoin		fragon	
A0	0.5±0.03		0.52±0.02	0.5±0.02
	***		***	***
A1	0.33±0.03	+	0.28±0.03	0.3±0.02
	0.41±0.03		0.4±0.03	

Figure 94 - Variations du ΔpH entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

Le ΔpH est plus élevé en surface. Il n'y a en revanche pas de différences entre sols sous fragon et sous témoins. La différence est presque significative en profondeur au niveau de l'horizon A1 avec des valeurs plus faibles sous fragon.

- **Matière organique et phosphore**

Comme les deux horizons étudiés sont organiques, il est nécessaire d'étudier la dynamique de la matière organique et du phosphore. Ceci passe avant tout par l'étude du taux de carbone qui reflète le mieux la concentration en matière organique (fig. 95).

	témoin		fragon	
A0	13.3±1.1		11±0.9	13.3±0.8
	***		***	***
A1	5.4±0.4	+	4.8±0.2	5.1±0.2
	9.4±1	+	7.9±0.8	

Figure 95 - Variations du taux de carbone (C en % sur sol sec) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

Comme tout cycle géochimique naturel, il apparaît que la teneur en carbone et donc en matière organique est plus élevée en surface. Même si c'est à la limite du significatif, il est bon de noter que pour l'horizon A1 sous les pieds de fragon, les teneurs en carbone semblent plus faibles.

La matière organique est aussi composée d'azote. Il est utile de s'intéresser à sa dynamique au sens où elle est parfois différente de celle du carbone (fig. 96).

	témoin		fragon	
A0	0.79±0.07		0.64±0.05	0.79±0.05
	***		***	***
A1	0.3±0.02	*	0.27±0.01	0.29±0.01
	0.55±0.06	+	0.46±0.05	

Figure 96 - Variations du taux d'azote (N en % sur sol sec) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

La même tendance générale apparaît pour l'azote. Cependant, la tendance comme quoi l'horizon A1 est moins concentré en matière organique sous fragon est ici significative à travers l'élément azote. La différence de dynamique entre ces deux éléments peut être abordée à travers l'étude de leur rapport de concentration (fig. 97).

	témoin		fragon	
A0	16.9±0.2		17.2±0.2	16.9±0.2
	*		+	**
A1	17.8±0.3		18±0.6	17.9±0.3
	17.4±0.2		17.6±0.3	

Figure 97 - Variations du rapport carbone/azote (C/N) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

Il n'apparaît aucune différence de C/N entre fragon et témoin. En revanche, le rapport C/N est plus élevé en profondeur. Enfin, la dynamique en termes de matière organique peut-être vue sous l'angle du phosphore assimilable (fig. 98).

	témoin		fragon	
A0	2078±591		1979±490	2078±408
			*	+
A1	2824±349		2964±299	2894±225
	2451±345		2472±300	

Figure 98 - Variations des concentrations en phosphore assimilable (en mg de P_2O_5/kg de sol sec) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

Le premier constat est que ces concentrations sont extrêmement élevées. Elles sont de l'ordre de 2500mg de phosphore assimilable par kilogramme de sol. Pour information, la médiane régionale pour un champ cultivé, donc amendé, se situe autour de 300mg/kg (Direction régionale de l'environnement Bretagne & Conseil régional de Bretagne, 1999). Les prélèvements réalisés ont des concentrations en phosphore qui se situent donc en moyenne presque dix fois au dessus de cette valeur. Les valeurs sont comparables à celles de parcelles en élevage intensif. C'est particulièrement étonnant alors que le milieu est une forêt. Dans ce genre de milieu, les concentrations sont généralement plus faibles du fait de l'absence d'engrais phosphorique rapporté. Un des prélèvements atteint une valeur de presque 15000mg/kg. C'est une des valeurs les plus fortes jamais observée sur la région. La répartition spatiale de ce phosphore apparaît plus élevée en profondeur et notamment sous fragon.

- ## Complexe absorbant

Enfin, la physico-chimie des sols de Pont-Calleck peut être perçue à travers les propriétés du complexe d'échange cationique. La capacité de ce complexe est la première donnée à observer (fig. 99).

	témoin		fragon	
A0	18.5±1.5		17.5±1.3	18.5±1
	**		***	***
A1	10.7±0.7		9.7±0.6	10.2±0.5
	14.6±1.2		13.6±1.1	

Figure 99 - Variations de la CEC (en cmol/kg de sol sec) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ *: p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

La CEC est plus élevée en surface. Le nombre de charges disponibles pour les cations est donc supérieur. Parmi les cations analysés, l'aluminium occupe une place importante (fig. 100).

	témoin		fragon	
A0	36.2±2.9		35.4±2.2	36.2±2
	*		+	**
A1	46.1±2.1		42.1±2.2	44.1±1.6
	41.2±2.1		38.7±1.7	

Figure 100 - Variation du taux d'occupation de la CEC par l'aluminium (Al/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ *: p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

L'aluminium occupe à peu près 40% des charges du complexe argilo-humique. Il est légèrement plus concentré en profondeur au niveau de l'horizon A1. Pour tous les autres cations analysés, la tendance est inverse (fig. 101 à 105). Leur concentration est supérieure en surface. Il n'apparaît pas de différences notables entre fragon et témoins. Seules les concentrations en fer attirent l'attention. Elles sont plus faibles sous fragon et notamment en surface. Il faut en revanche tempérer ces résultats au sens où le fer est très faiblement concentré. Ces cations n'occupent qu'environ 1% du total des charges du complexe. Les éventuelles marges d'erreurs de mesure à l'ICP peuvent être responsables d'une telle différence.

	témoin		fragon	
A0	4.92±0.89		4.18±0.99	4.92±0.62
	***		***	***
A1	1.02±0.13		0.95±0.1	0.99±0.08
	2.97±0.61		2.57±0.6	

Figure 101 - Variation du taux d'occupation de la CEC par le calcium (Ca/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ *: p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

	témoin		fragon	
A0	1.76±0.19	+	1.3±0.23	1.76±0.13
	***		***	***
A1	0.49±0.16		0.35±0.13	0.42±0.1
	1.12±0.18	*	0.83±0.16	

Figure 102 - Variation du taux d'occupation de la CEC par le fer (Fe/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

	témoin		fragon	
A0	2.87±0.36		2.43±0.37	2.87±0.25
	***		***	***
A1	1.23±0.1		1.13±0.16	1.18±0.09
	2.05±0.25		1.78±0.24	

Figure 103 - Variation du taux d'occupation de la CEC par le potassium (K/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

	témoin		fragon	
A0	4.77±0.74		4±0.78	4.77±0.51
	***		***	***
A1	1.42±0.09		1.49±0.19	1.45±0.1
	3.09±0.52		2.74±0.48	

Figure 104 - Variation du taux d'occupation de la CEC par le magnésium (Mg/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

	témoin		fragon	
A0	0.75±0.1		0.67±0.11	0.75±0.07
	*		+	***
A1	0.42±0.07		0.47±0.1	0.45±0.06
	0.59±0.07		0.57±0.08	

Figure 105 - Variation du taux d'occupation de la CEC par le sodium (Na/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

Etant donné que toutes les bases échangeables se comportent pareil, le taux de saturation du complexe par ces bases (S/T) suit la même direction (fig. 106).

	témoin		fragon	
A0	13.3±1.9		11.3±2.2	13.3±1.3
	***		***	***
A1	4.1±0.3		4±0.5	4.1±0.3
	8.7±1.4		7.7±1.4	

Figure 106 - Variation du taux du taux de saturation en bases de la CEC (S/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

Les cations dits basiques sont nettement plus concentrés en surface. Toutefois, ils n'occupent en moyenne qu'environ 10% des charges du complexe. Avec l'aluminium et le fer, cela ne représente en moyenne qu'environ 50% seulement des charges occupées. Il y a donc un forte proportion du complexe occupée par des protons (fig. 107).

	témoin		fragon	
A0	48.7±3.3		52±2.7	48.7±2.3
A1	49.3±2.2		53.6±2.6	51.4±1.7
	49±1.9	+	52.8±1.8	

Figure 107 - Variation du taux de CEC potentiellement occupée par des protons (H/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (*+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001*)

Ces charges restantes potentiellement occupées par des protons ne présentent que peu de variations. Elles sont toujours aux environs de 50%. Notons toutefois que ces protons semblent occuper une place plus importante du complexe sous le fragon. Cette différence n'est toutefois pas significative. Aucune différence entre horizons n'apparaît vraiment.

8.3.2 Discussion

8.3.2.1 Différences de physico-chimie entre horizons de sol

- ***Cycles biogéochimiques naturels***

Du point de vue des propriétés des sols, les différences observées entre horizons révèlent, pour la plupart, des cycles tout à fait concordants avec le milieu d'étude.

Au niveau drainage, le taux de pierrosité est plus fort en profondeur (fig. 87). Les éléments grossiers sont moins altérés et moins disparates à proximité de la roche mère. Les horizons A1

sont plus minéraux et moins organiques. Pour l'eau, il apparaît que le taux d'humidité est plus fort en surface (fig. 91). Les apports en eau sont essentiellement pluviométriques. Il n'y a pas d'apport par nappe souterraine.

L'acidité apparaît plus forte en surface. Cela se distingue aussi bien au niveau de l'acidité réelle (pH_{eau}), de l'acidité potentielle (pH_{KCl}) que de la différence entre les deux (ΔpH) (fig. 92 à 94). L'acidité par les protons est clairement une acidité de surface, une acidité organique. La matière organique acidifie fortement les sols.

Comme toute séquence pédologique forestière, cette matière organique est plus concentrée en surface. La chute de feuilles, leur accumulation sous forme de litière et leur décomposition sont la cause de cet enrichissement de surface. Cela se voit notamment bien pour ce qui est des concentrations en carbone (C) et azote (N) (fig. 95 et 96). Le rapport entre ces deux éléments (C/N) est plus élevé en profondeur (fig. 97). Il y a réabsorption de l'azote par les plantes au cours de sa minéralisation alors que le carbone reste dans le sol. Il y a donc appauvrissement relatif en profondeur en azote. Les observations de terrain tendent globalement à qualifier les humus de moder au niveau des sondages réalisés. Cet appauvrissement d'azote en profondeur est classique de ce type d'humus.

Cet enrichissement de matière organique en surface tend à augmenter la capacité d'échange cationique (fig. 99). La matière organique est un des composants du complexe argilo humique (CAH). La CEC est donc proportionnelle à la concentration en matières organiques.

Ce complexe attire les cations. Les cations dits basiques et le fer sont des nutriments. Ils sont assimilés par les plantes. Ils sont ici faiblement disponibles dans le milieu. Il y a donc assimilation quasi totale de ces derniers par les plantes. Le retour au sol par chute des feuilles (*feedback*) fait que ces nutriments sont plus concentrés en surface comme pour l'azote (fig. 101 à 106).

En revanche, l'aluminium est plus fortement concentré en profondeur : il est toxique pour les espèces végétales (fig. 100). Il n'est pas assimilé. Il n'y a pas de *turnover* permettant la remontée de l'aluminium en surface. En surface, les plus faibles concentrations peuvent aussi être accentuées par un effet dilution lié à l'enrichissement en surface des autres cations. Les concentrations en aluminium ne sont pas négligeables. A de telles concentrations, l'aluminium peut réellement être toxique pour la flore. Cette toxicité par l'aluminium est qualifiée d'acidité minérale.

- ***Cycles biogéochimiques perturbés***

Le phosphore est plus concentré en profondeur (fig. 98). Il devrait être corrélé avec le taux de matière organique et donc de carbone et d'azote. Ses concentrations sont normalement très faibles et plus concentrées en surface. Il y a un retour de phosphore dans le cycle par l'intermédiaire de la litière comme pour l'azote. D'habitude, une fois minéralisé, il est assimilé presque totalement par les plantes. Cette anomalie dans le cycle est clairement d'ordre archéologique. La seule explication de la différence observée entre horizons semble venir du fait que le phosphore est plus concentré dans le sol que dans les plantes. Les feuilles

mortes apportent en surface une matière organique « pauvre » en phosphore par rapport au sol. Après des siècles d'abandon et de forêt, cet apport de matière organique aurait contribué à appauvrir significativement l'horizon de surface en phosphore.

L'impact des structures archéologiques sur le fonctionnement des sols peut aussi être abordé à travers les artéfacts. Les charbons de bois et les graines carbonisées sont nettement plus concentrés en profondeur (fig. 88 et 90). L'accumulation de matière organique en surface par décomposition des litières a permis d'« enfouir » les horizons archéologiques contenant ces artéfacts. Ces éléments grossiers ne peuvent être remontés en surface que par des perturbations. L'activité biologique peut jouer un rôle dans ces remontées sous forme de galeries. Des accidents de type chablis peuvent aussi alimenter cette homogénéisation des horizons. Toutefois ces perturbations semblent minimes puisque les différences physico-chimiques entre les horizons A1 et A0 sont flagrantes à tous points de vue.

8.3.2.2 Différences de physico-chimie des sols sous fragon

Par rapport aux différences de physico-chimie des sols entre horizons, il n'apparaît pas de grosses différences entre pieds de fragon et témoins. Les seules différences vraiment marquantes sont des différences d'acidité. En profondeur, au niveau de l'horizon A1, l'acidité est moins forte sous fragon. Cette différence se remarque aussi bien pour l'acidité réelle (pH_{eau}) que pour l'acidité potentielle (pH_{KCl}) (fig. 92 et 93). Pour les autres variables physico-chimiques, il apparaît de petites différences de concentrations mais pas ou peu significatives. Sous fragon, les sols semblent légèrement moins riches en matière organique et en fer (fig. 95, 96 et 102).

- ***Apports à l'écologie du fragon***

Il apparaît qu'en forêt de Pont-Calleck le fragon préfère des situations locales où les sols sont légèrement moins acides. Les structures archéologiques découvertes à la fouille semblent responsables de ces différences d'acidité. En effet, les différences s'observent à une échelle très fine. Les prélèvements témoins ne sont distants des prélèvements sous fragon que de deux mètres maximum. De plus, ces différences s'observent essentiellement en profondeur. Leur origine a de grandes chances d'être archéologique. Une distance plus élevée entre relevés et témoins mettrait probablement en évidence d'autres différences qui auraient apporté des renseignements sur l'écologie du fragon. Des réplicats plus nombreux auraient aussi renforcé ces analyses.

Toutefois, les statistiques de différences entre fragon et réplicats ne sont pas les seules informations à enrichir la connaissance sur l'écologie du fragon. Tous les sondages sans exception présentent une physico-chimie des sols similaire. Il est donc possible de dire que le fragon recherche ou tolère des sols présentant ces caractéristiques. Le fragon tolère les sols forestiers assez acides, mais avec une certaine limite comme il a pu être vu précédemment. Les sols bruns lessivés peu riches en cations basiques ne semblent pas l'importuner. Toutes ces données vont dans le sens de ce qui est connu sur l'écologie du fragon. En revanche, la présence systématique de très fortes teneurs en phosphore disponible ne peut que lancer des

questionnement sur le rôle de ce phosphore dans la présence du fragon. Le fragon est-il une espèce typiquement phosphorophile ?

Figure 108 - Exemple de pied de fragon poussant dans un poulailler (*Neuville, 19 ; photographie : Sophie LESCURE 2009*)

Pour vérifier si le fragon est une espèce phosphorophile, il faudrait d'abord observer quelles sont les concentrations en phosphore dans les zones de la forêt de Pont-Calleck vierges de vestiges et de fragon. Il faudrait aussi réaliser des réplicats et des témoins (peut-être à plus forte distance des réplicats) sur de nombreux pieds de fragon en dehors de la forêt de Pont-Calleck pour vérifier ce phénomène à une échelle moins locale. La concentration extrême d'un des prélèvements autour de 15000mg de P_2O_5 disponible par kilogramme de sol pose des questions sur la nature des activités archéologiques pouvant être à l'origine de telles concentrations en phosphore à Pont-Calleck. Pour certains sondages, des scories ont été retrouvées (annexe 11). Elles sont réputées pour enrichir le sol en minéraux et notamment en phosphore. Les concentrations en phosphore de ces sondages sont élevées (annexe 15). Il est bon de rappeler que le fragon a déjà été observé sur des sites d'activité métallurgique (Cf. Chapitre 3). Toutefois, le fragon n'est pas spécifique de ce type d'activité. Seuls les sondages I et II présentent des scories. Au niveau du sondage VII où la concentration en phosphore est la plus élevée, seules des activités d'élevage semblent pouvoir expliquer une telle accumulation de phosphore. La concentration observée est même supérieure aux concentrations mesurées sur fèces de porcins ou de bovins. Les excréments d'oiseaux sont en revanche plus concentrés. Il est possible d'imaginer que le fragon marque à Pont-Calleck

l'emplacement d'anciens poulaillers. Pour confirmer cette présence de poulaillers, l'analyse paléoparasitologique des prélèvements de sol pourrait apporter des éléments de réponse. L'observation de fragon au niveau de poulaillers actuels permet aussi de renforcer cette hypothèse (fig. 108).

Les autres observations réalisées tendent également à renforcer l'hypothèse du fragon comme espèce phosphorophile. La présence d'un fourré extrêmement dense de fragon au niveau d'un cimetière à Comblessac (Ille-et-Vilaine) conforte l'hypothèse d'une affinité du fragon pour le phosphore. En effet, les os sont une source naturelle de phosphore. Un cimetière présente donc de plus fortes concentrations en phosphore que le milieu environnant. Les pieds de fragon repérés à l'intérieur de dolmens sur les îles de Groix et de Saint-Nicolas-des-Glénan vont aussi dans ce sens (Cf. Chapitre 3). Enfin, en position naturelle, le fragon est assez fréquent sur la côte. Les bords de mer sont généralement enrichis en phosphore par le guano.

- ***Possible modification du milieu par le fragon***

Les sols sous fragon ont une teneur en matière organique légèrement plus faible. Le fragon pousse de manière assez dense, est sempervirent et épineux. Tous ces facteurs empêchent les feuilles mortes de tomber au pied du fragon. Ceci contrecarre la formation de litière au sol sous le fragon. Il n'y a pas d'apports en matière organique. Il n'y a pas non plus d'apports de minéraux. Cette différence est remarquable, même si elle n'est pas significative. En surface, toutes les concentrations moyennes en nutriments sont inférieures sous fragon. Cette particularité peut expliquer l'affinité du fragon à pousser sur des sols plus riches ou au pied de souches en décomposition qui vont petit à petit libérer les éléments nécessaires à sa croissance lors de leur décomposition. Le fragon, en ayant développé une stratégie de compétition et de résistance au stress, s'est donc condamné à ne pouvoir pousser que dans certains milieux où les ressources minérales sont assez importantes, notamment en phosphore.

8.4 Discussion générale

8.4.1 Phénomène de sensibilité à la profondeur de prélèvement

L'analyse verticale des propriétés des sols de Pont-Calleck révèle que leur variabilité verticale est supérieure à leur variabilité latérale. Lors d'une analyse spatiale comme au Goënidou ou à Kervédan, il y a ainsi une certaine marge d'erreur dans la représentation des propriétés de l'horizon A1. Celui-ci n'est *a priori* pas homogène. L'analyse des cartes des propriétés physico-chimiques de cet horizon pour le site du Goënidou semble le confirmer. Des motifs en bandes apparaissent notamment pour le pH_{eau}, le pH_{KCl} et le C/N : les trois préleveurs n'ont pas échantillonné de manière similaire : il semble que l'échantillonnage de l'horizon A1 ait été effectué plus ou moins profondément.

De plus, ces erreurs peuvent être liées à des fluctuations de pH et à des pertes d'azote post-prélèvement. Le nombre important d'échantillons n'a pas permis d'effectuer les analyses en même temps. Les variations observées peuvent ainsi être dues au découpage des analyses en

séries.

Pour ce genre d'analyses, dans le futur, il sera bon de prendre plus garde au protocole de prélèvements et de noter le nom du préleveur. Le temps entre les prélèvements sur le terrain et les analyses devra être réduit au maximum, pour éviter les phénomènes d'évolution post-prélèvement de ces sols. Un échantillon de sol commun à chaque série d'analyse devrait permettre une calibration, de comparer les séries et d'identifier les problèmes d'évolution temporelle.

8.4.2 Impact des occupations archéologiques sur le fonctionnement des sols

Pour chaque site, la nature géologique est différente. Le milieu végétal n'est pas non plus équivalent. Or le substrat et la flore conditionnent les caractéristiques des sols. Ainsi, pour chaque site, les gammes de valeurs des différentes variables mesurées ne sont pas similaires. Il n'est possible de comparer les sites qu'en termes de variations relatives, qui sont celles qui nous interressent avant tout.

Sur l'habitat déserté du Goënidou, l'ensemble des propriétés des sols est différent au niveau des occupations. A Kervédan, l'apport de minéraux par les embruns et notamment de sodium est particulièrement marqué dans la partie ouest de l'éperon. Malgré ce gradient naturel fort, il apparaît que des propriétés de drainage particulières sont visibles sur les structures. Pour chacun de ces sites, les variations sont très locales. Les fluctuations de l'environnement physique au sein de chaque zone d'étude ne peuvent expliquer ces différences. Elles ne peuvent avoir qu'une origine archéologique. En forêt de Pont-Calleck, le cycle vertical du phosphore est perturbé : les concentrations sont nettement supérieures au niveau des horizons profonds, c'est-à-dire des horizons archéologiques.

Pour chaque site ayant fait l'objet d'études des propriétés des sols, il y a un impact indéniable des occupations archéologiques sur le fonctionnement des sols.

8.4.3 Impact différentiel en fonction des sites d'études et de la typologie

Les modifications des sols par les occupations anciennes ne sont pas équivalentes entre les différents sites étudiés. Chaque site a son particularisme.

Sur l'habitat déserté du Goënidou, les occupations affectent le fonctionnement du sol dans son ensemble. Les aires d'occupation sont caractérisées par des sols différents. Elles suivent un gradient d'activité diffuse/activité agraire/activité domestique. Les zones d'activité domestique sont caractérisées par des sols plus organiques, plus riches en éléments nutritifs et moins soumis à l'acidité aluminique.

En forêt de Pont-Calleck, l'étude concerne des sites archéologiquement similaires au Goënidou. Sur ces derniers, il y a eu un enrichissement massif en phosphore qui n'a rien de comparable avec celui observé sur Le Goënidou. Chaque site a son histoire. A Pont-Calleck, la faible étendue des sondages ne permet pas de vérifier si les autres propriétés des sols sont aussi modifiées comme au Goënidou.

A Kervédan, le site a aussi une histoire différente. C'est un site de l'Age du Fer, donc nettement plus ancien. Il est en milieu ouvert et soumis à l'érosion. A la fouille, seuls quelques lambeaux de sols archéologiques ont pu être observés. Cette érosion fait qu'il n'y a qu'un impact faible du site sur la physico-chimie des sols. En revanche, les structures en creux apparaissent nettement et quelques murs sont encore conservés. Sur les structures en creux, les propriétés de drainage sont modifiées : les sols ont une meilleure rétention d'eau l'été.

8.4.4 Impact fonctionnel *versus* impact structurel

Suivant l'échelle d'étude, les différences de physico-chimie des sols sont plus ou moins marquées. Au Goënidou, entre aires d'activité, les propriétés des sols sont profondément modifiées. A Kervédan, à l'échelle des structures, seules les structures en creux se révèlent par des propriétés de drainage différentes.

En analysant plus en détail les cartes de Kervédan (annexe 14), il apparaît que le sondage I présente des propriétés physico-chimiques des sols différentes de celles des autres sondages : le fer occupe une place plus importante dans le complexe d'échange cationique, aux détriments des cations dits basiques. Sur ce sondage I, de nombreux morceaux de terre rubéfiée (éléments de clayonnage) ont été observés. Or, la couleur rouge de ces éléments est liée au fer. Leur altération peut être à l'origine de cet enrichissement en fer assimilable. L'activité humaine supposée à cet endroit différente des autres, comme en témoignent ces éléments de clayonnage, explique cette particularité. Au sein des sondages I et II, des variations de physico-chimie peuvent aussi être remarquées. Sur le sondage I, les sols sont différents à l'est des trous de poteaux. Les sols y sont légèrement plus riches en cations dits basiques. Le même phénomène est observable sur le sondage II entre les deux fossés. Ce sont des effets barrières, ils reflètent clairement des activités originales. La taille réduite des sondages et le manque de conservation des sols archéologiques n'ont pas permis de révéler la nature de ces activités. Même après plus de deux mille ans et des phénomènes d'érosion ayant détruit les niveaux d'occupation, les activités anciennes ont encore une influence sur les propriétés des sols. Cet impact sur le fonctionnement des sols est durable.

Il semble ainsi que la physico-chimie des sols soit plus sensible aux aires d'activité qu'aux structures elles-mêmes. Il y a un impact fonctionnel plus qu'un impact structurel. Les différences observées peuvent être attribuées à des transferts de matériaux d'une aire d'activité vers une autre.

8.4.5 Impact des modifications du sol sur la flore

Dans l'analyse de chaque site, il parait indéniable que les modifications des sols par les activités humaines passées ont un impact sur la flore. Celui-ci est plus ou moins marqué en fonction des sites. Dans tous les cas analysés, le milieu est plus favorable au niveau des occupations.

Sur Le Goënidou, l'ensemble des propriétés des sols suit le même gradient d'activité que la flore. Le lien entre ces deux gradients ne peut être fortuit. La flore des bâtiments a

potentiellement une affinité pour les milieux plus organiques, plus riches et moins toxiques du point de vue des ions aluminium.

Pour le site de Kervédan, les structures en creux hébergent une flore particulière. Elles sont caractéristiques de sols retenant mieux l'eau en été. Cette meilleure disponibilité de l'eau est sans aucun doute, du moins en partie, à l'origine des différences de flore observées à ce niveau.

A Pont-Calleck, le sol est moins acide sous les pieds de fragon. Associé à cela, les concentrations en phosphore assimilable sont nettement supérieures à la normale. Ces différences de sol peuvent en partie expliquer la présence de cette espèce. Elle semble avoir une affinité pour les sols très riches en phosphore et ne pas tolérer les sols trop acides.

8.4.6 Impact possible de la flore sur les sols

Dans tous les cas, il n'est pas impossible d'exclure un éventuel impact de la végétation sur les sols.

Concernant Le Goënidou, la fougère, plus abondante sur les bâtiments, participe au *turnover* des nutriments : ses rhizomes profonds ramènent en surface les éléments nutritifs et empêchent leur lessivage. Elle a donc un impact sur le fonctionnement des sols. Les aires d'activité agraire sont caractérisées par l'absence d'espèces dominantes : il y a moins d'accumulation de litière. Ce phénomène peut expliquer la présence d'un rapport C/N plus faible.

Sur Kervédan, la flore a un meilleur pouvoir de recouvrement sur les structures en creux. Le sol est mieux protégé des rayons solaires. La dessiccation en période de forte chaleur est moins importante. Cela peut, en partie, expliquer les différences d'humidité observées sur structures en creux.

Le fragon, en forêt de Pont-Calleck, peut aussi être à l'origine de modifications du sol. Ses caractéristiques morphologiques empêchent la chute des feuilles mortes au sol. L'absence de formation de litière à son pied peut contribuer à appauvrir localement le sol.

Conclusion

Sur les sites du Goënidou et de Kervédan les propriétés de l'horizon de sol hémiorganique A1 sont différentes sur les occupations anciennes. A Pont-Calleck, l'analyse physico-chimique des différents horizons montre que les niveaux archéologiques ont bouleversé la dynamique verticale des sols. Les occupations humaines passées ont modifié durablement les cycles biogéochimiques.

Ces modifications ne sont pas équivalentes d'un site à l'autre, ni au sein d'un même site. L'habitat du Goënidou a eu un impact sur l'ensemble des propriétés des sols. A Pont-Calleck, sur des sites équivalents archéologiquement, seules l'acidité et les concentrations en phosphore semblent modifiées. Sur l'éperon barré de Kervédan, les sols archéologiques sont mal conservés. Il ne reste globalement comme traces que des structures en creux. Au niveau de celles-ci, les sols retiennent mieux l'humidité. Si ce type de structure modifie les propriétés de drainage des sols, il apparaît toutefois que les modifications chimiques semblent plutôt

dues à différentes aires d'activité. Lors des occupations, des transferts de matière ont eu lieu d'une aire vers une autre. Ils sont sûrement à l'origine de la majorité des différences observées.

Toutes ces perturbations du sol ont indéniablement un rôle dans l'impact des occupations anciennes sur la végétation actuelle. Dans tous les cas, les sols sur structures sont potentiellement plus favorables aux végétaux. Les ressources en eau ou en nutriments sont souvent plus élevées et l'acidité moindre. Dans le cas du fragon, l'hypothèse d'une espèce phosphorophile est avancée.

Il n'est pas à exclure l'existence d'un éventuel rôle de la flore dans les différences de propriétés des sols observées.

Chapitre 9 Analyse de l'impact des occupations archéologiques sur la flore à travers l'écologie des espèces végétales

Les occupations archéologiques étudiées ont modifié l'environnement, notamment les propriétés des sols. Ces modifications peuvent en partie expliquer les différences de flore observées (Cf. Chapitre 8). L'étude bibliographique du fragon a montré que d'autres causes peuvent être envisageables pour expliquer ces changements de végétation (Cf. Chapitre 3). Seule l'étude écologique des espèces peut apporter des réponses quant au rôle éventuel de ces autres facteurs. Ces analyses ne peuvent être effectuées que sur les sites ayant fait l'objet de relevés de l'ensemble de la végétation : l'habitat déserté du Goënidou et l'éperon barré de Kervédan.

9.1 Goënidou

9.1.1 Résultats

Pour le site du Göenidou, l'ensemble de la flore vasculaire a été étudié. A partir de ces données, pour chaque relevé, il a été possible de caractériser la flore et le milieu. La fougère aigle n'a pas fait l'objet de relevés d'abondances. Elle n'est donc pas intégrée dans cette partie de l'étude.

9.1.1.1 Caractérisation de la flore (descriptions)

Les traits biologiques des espèces ont été analysés (annexe 16). A chaque relevé, la proportion d'espèces présentant un caractère particulier a été attribuée. Pour chaque caractéristique, une carte représentant la variation du pourcentage d'espèce présentant cet attribut a été dressée (annexe 17).

Les liens entre ces variables et les structures peuvent être synthétisés en intégrant ces données à l'analyse factorielle multiple (AFM) du site. La matrice a dû être épurée avant d'être intégrée à l'analyse. Pour certaines modalités, les pourcentages dans tous les relevés sont nuls ou égaux à 100%. Ces variables de variance nulle ont été éliminées. Les restantes forment la matrice des descriptions. Celle-ci est intégrée directement dans l'AFM comme groupe supplémentaire (fig. 109).

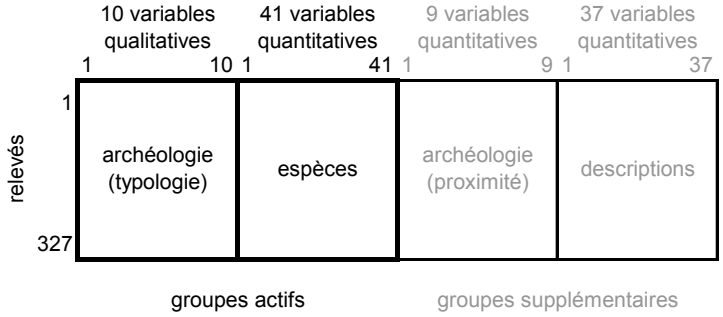


Figure 109 - AFM du Goënidou : structure des données utilisées pour l'analyse des traits biologiques

L'interprétation de l'AFM en termes d'espèces et de structures archéologiques est abordée dans le chapitre 7.2. Sa signification en termes de physico-chimie des sols est analysée dans le chapitre précédent (Cf. 8.1). Le premier facteur oppose les zones de structures des zones sans structures. L'axe 2 permet de distinguer les zones d'activité agraire. Ces rappels effectués, il est possible d'analyser la nature de ces axes en termes de traits biologiques.

- ***Statut***

Les espèces sont tout d'abord analysées suivant leur statut dans la base du BSBI (fig. 110).

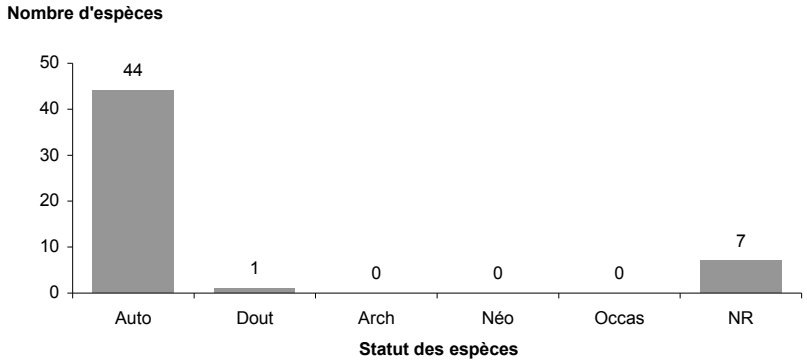


Figure 110 - Statut des espèces du site du Goënidou (*Auto : autochtones ; Dout : statut douteux ; Arch : archéophytes ; Néo : néophytes ; Occas : allochtones occasionnelles ; NR : espèces non renseignées*)

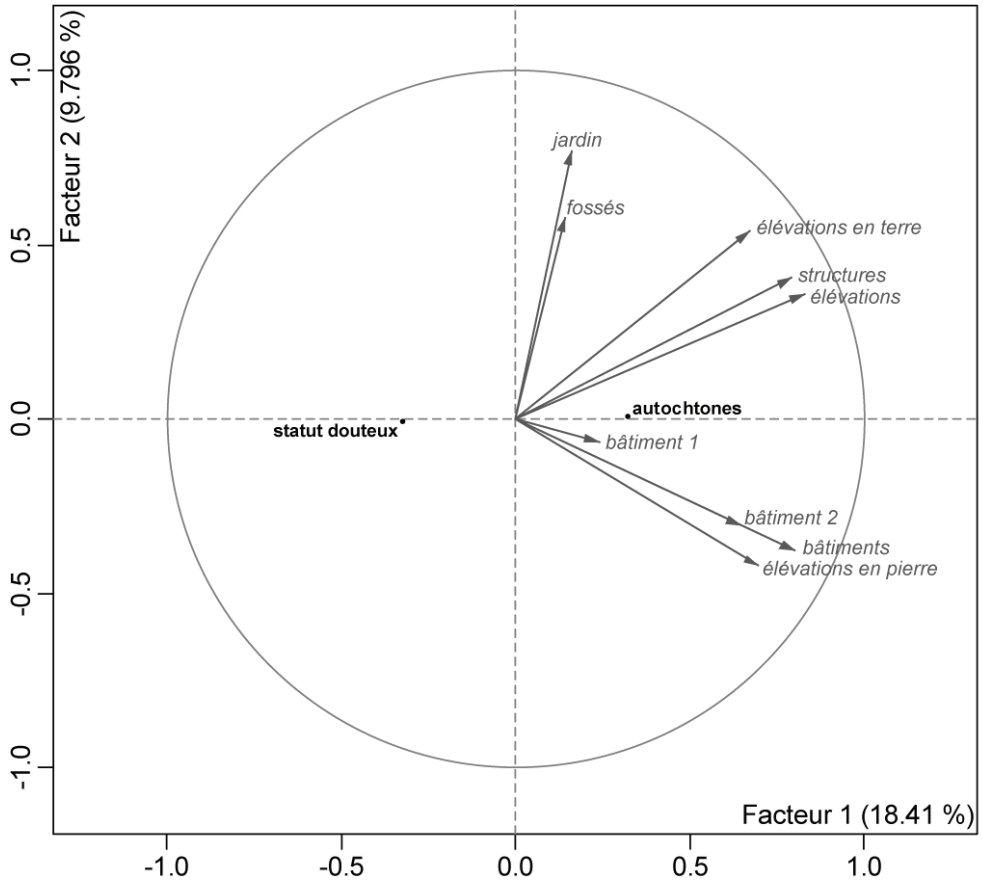


Figure 111 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 du statut des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures

Il apparaît que sur les 52 taxons étudiés, sept ne sont pas renseignés. Pour les espèces documentées, toutes sont autochtones sauf une : *Scorzonera humilis*. Son statut est douteux : elle est potentiellement introduite. Il n'y a aucune acclimatation certaine que ce soit pour les périodes anciennes (archéophytes), récentes (néophytes) voire très récentes (allochtones occasionnelles).

Le pourcentage d'espèces de chaque statut dans les relevés peut être projeté dans l'espace des variables de l'AFM (fig. 111).

Il apparaît sur ce graphique que le statut des espèces semble lié à l'axe 1 de l'AFM. Il y aurait plus d'autochtones sur les structures et une plus forte proportion de statuts douteux hors structures. Toutefois, cette distinction ne tient qu'à un seul taxon : cette représentation des statuts reflète uniquement le fait que la scorsonère fuit les zones d'occupation.

- ***Types biologiques***

L'écologie des espèces peut aussi être abordée à travers l'étude des types biologiques consignés dans la base Plantatt (fig. 112).

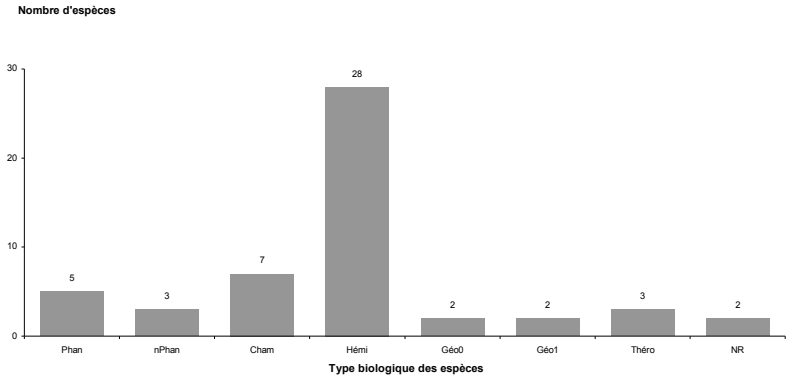


Figure 112 - Types biologiques des espèces du site du Goënidou (*Phan : méga-méso-microphanérophytes ; nPhan : nanophénérophytes ; Cham : chaméphytes ; Hémi : hémicryptophytes ; Géo0 : géophytes non bulbeuses ; Géo1 : géophytes bulbeuses ; Théro : thérophytes ; NR : espèces non renseignées*)

Seules deux espèces ne sont pas renseignées. Il apparaît que plus de la moitié (28) sont des hémicryptophytes. Parmi les autres types biologiques, seuls les chaméphytes et les phanérophytes arrivent à rassembler plus de trois taxons. Les autres types sont très minoritaires.

Chaque modalité est projetée dans l'espace des variables de l'AFM en fonction de leurs pourcentages dans chaque relevé (fig. 113).

L'analyse des liens de ces variables avec les variables de proximité aux structures montre que les types biologiques semblent se répartir en fonction de la présence/absence de bâtiments. La proportion d'arbustes (méga-méso-microphanérophytes) est plus importante sur ces derniers. C'est aussi le cas des taxons passant l'hiver à l'état de bulbes (géophytes à bulbes). Toutefois ce groupe ne contient ici que deux espèces : la jonquille *Narcissus pseudonarcissus* et la jacinthe *Hyacinthoides non-scripta*. Les autres types biologiques ont

d'après l'AFM une affinité pour les zones non domestiques. Les plantes annuelles (thérophytes) semblent échapper à cette tendance et ne pas être influencées par la présence de structures. L'analyse des cartes ne semble pas mettre en évidence de liens nets à l'exception des méga-méso-microphanérophytes et des géophytes à bulbes. La cause d'affinité des autres types biologiques pour les zones non bâties semble liée au fait de travailler sur des pourcentages. Il y a une proportion de méga-méso-microphanérophytes et de géophytes à bulbes plus faible hors bâtiments. Les parts des autres types s'en trouvent ainsi accrues même s'il n'y a pas de liens spatiaux très nets.

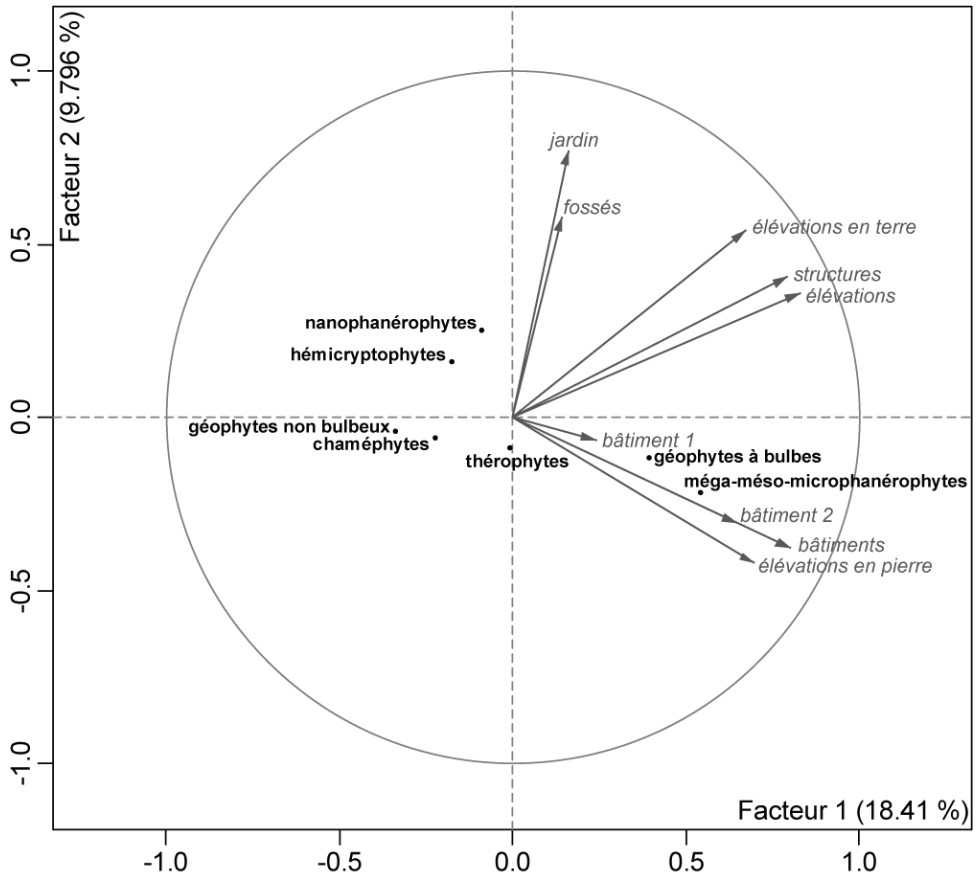


Figure 113 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des types biologiques des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures

- ***Modes de dispersion***

Il est ensuite possible d'aborder l'écologie des espèces via leurs modes de dispersion des graines répertoriés par la base Plantatt (fig. 114).

Au niveau des modes de dispersion des graines, huit espèces ne sont pas renseignées. Le nombre de comportements est nettement supérieur au nombre de taxons : certains ont différentes stratégies. Les modes de dispersion les plus courants sur ce site sont l'ingestion par les oiseaux (endoornithochorie), le vent (anémochorie), les fourmis (myrmécochorie) et le simple poids des graines (barochorie). Les autres modes ne sont utilisés que par un nombre très faible d'espèces.

L'analyse de l'AFM a été confrontée à ces modes de dispersion (fig. 115).

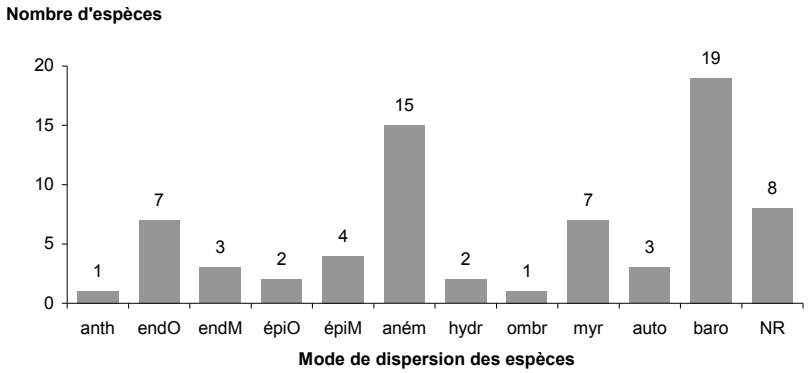


Figure 114 - Modes de dispersion des espèces du site du Goënidou (*anth : anthropochores ; endO : endoornithochores ; endM : endomammochores ; épiO : épiornithochores ; epiM : épimammochores ; aném : anémochores ; hydr : hydrochores ; ombr : ombrochores ; myr : myrmécochores ; auto : autochores ; baro : barochores ; NR : espèces non renseignées*)

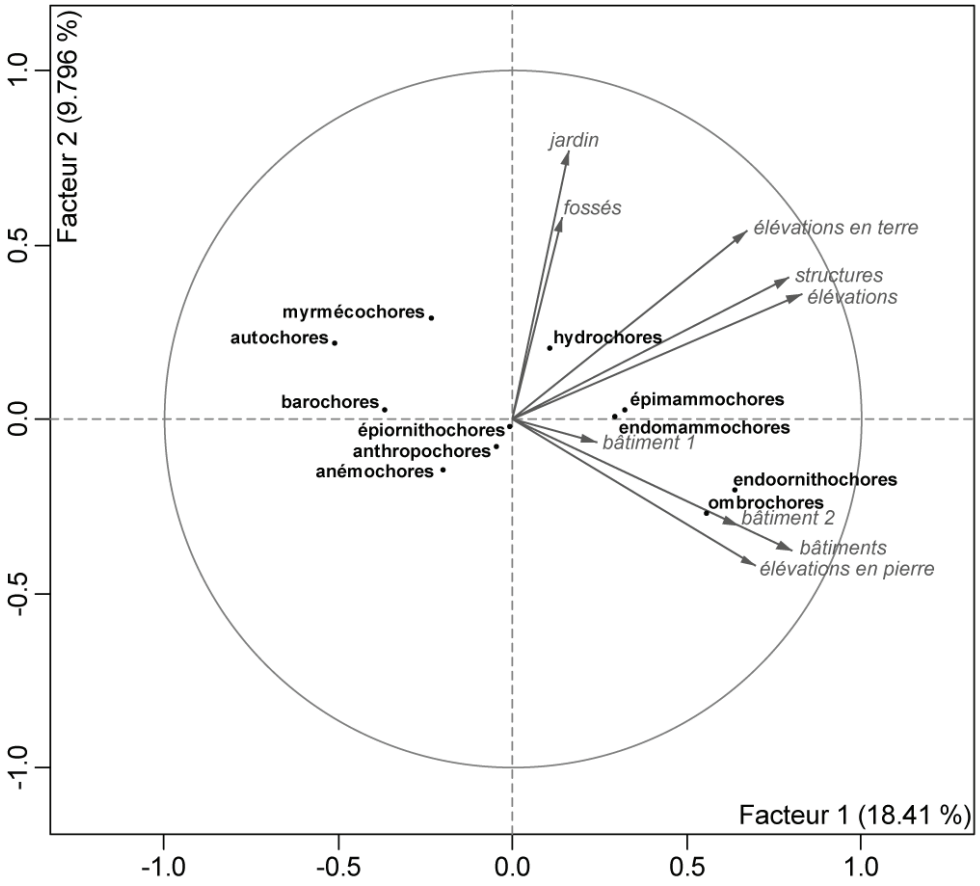


Figure 115 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des modes de dispersion des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures

Comme pour les types biologiques, il apparaît une discrimination entre zones bâties et zones non bâties. Les espèces dont les graines sont dispersées par la pluie (ombrochores) et

les oiseaux (endoornithochores) sont plus fréquentes sur les bâtiments. Toutefois, le groupe des ombrochores n'est représenté que par la houlque molle *Holcus mollis*. La dispersion par les mammifères est aussi favorisée, de manière moins nette, sur les bâtiments. Celle-ci peut se faire par ingestion puis excrétion des graines dans les fèces (endomammochorie) ou par accroche des graines dans le pelage (épimammochorie). Les espèces affines des zones non bâties ont plus des modes de dispersion des graines à faibles distances. Les espèces de ces zones propagent leurs graines par propulsion (autochorie), par les fourmis (myrmécochorie) ou par simple gravité (barochorie). La proportion d'espèces anémochores, qui est le deuxième mode principal de dispersion, n'est pas liée au premier plan factoriel. Le vent disperse indifféremment les graines entre structures et hors structures.

- ***Mode de multiplication***

La propagation ne se fait pas uniquement par les graines. Certains taxons utilisent la multiplication végétative et parfois de manière quasi exclusive. Les comportements de multiplication des espèces du site sont consignés dans la figure 116.

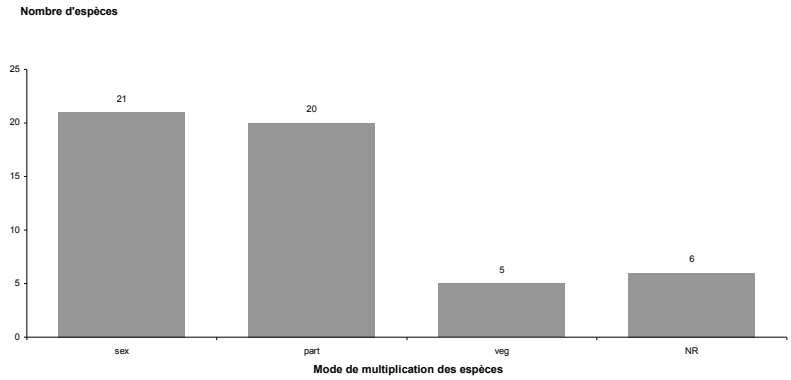


Figure 116 - Modes de multiplication des espèces du site du Goënidou (*sex : reproduction sexuée ; part : reproduction partagée(sexuée et végétative) ; veg : veproduction végétative ; NR : espèces non renseignées*)

Il apparaît qu'il y a un nombre équivalent d'espèces à avoir développé une stratégie de multiplication uniquement sexuée, que d'espèces ayant une stratégie mixte. La multiplication exclusivement végétative est plutôt rare.

Ces stratégies de multiplication sont utilisées dans l'interprétation des axes de l'AFM à travers la figure 117.

Elles sont peu liées avec le premier facteur de l'AFM. En revanche, elles sont corrélées avec l'axe 2. Il apparaît que dans les zones agraires, les espèces à multiplication exclusivement sexuée sont plus fréquentes. Les modes de multiplication végétative et mixte sont plus fréquents pour les espèces poussant en dehors de ces zones agraires.

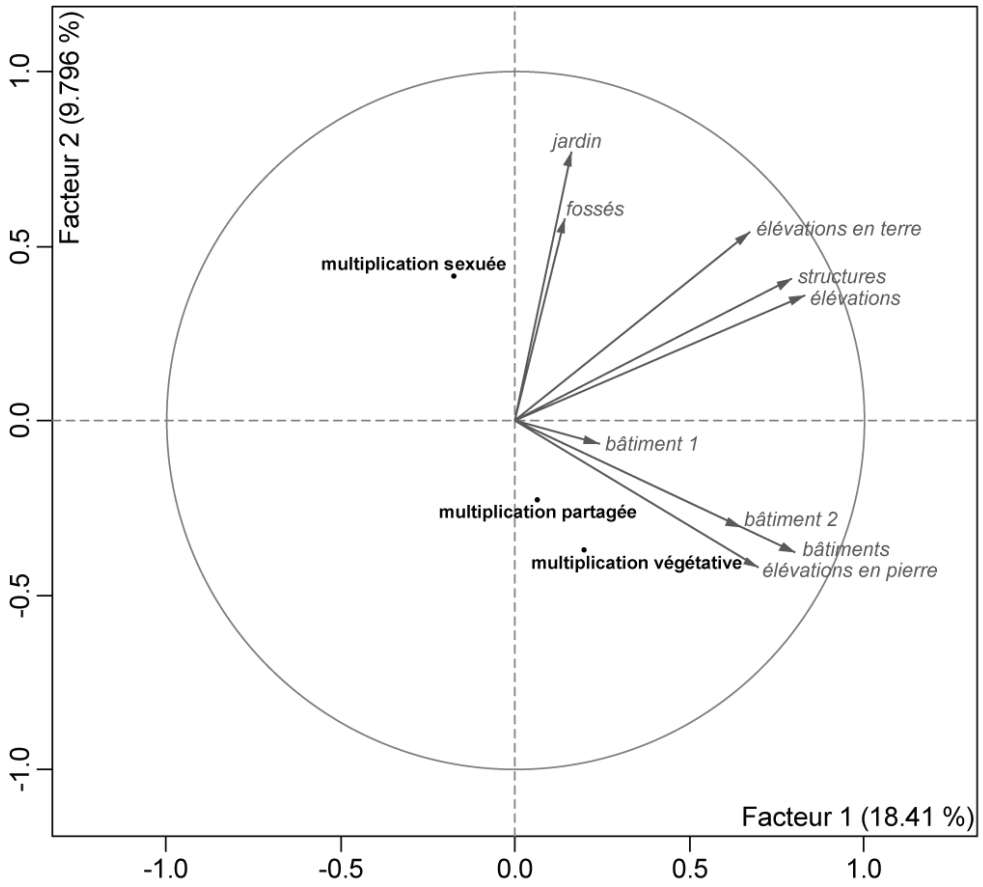


Figure 117 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des modes de multiplication des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures

- ***Période de floraison***

Les espèces peuvent aussi être analysées en fonction de leurs périodes de floraison (fig. 118). Ces périodes sont tirées de la base Ecoflora.

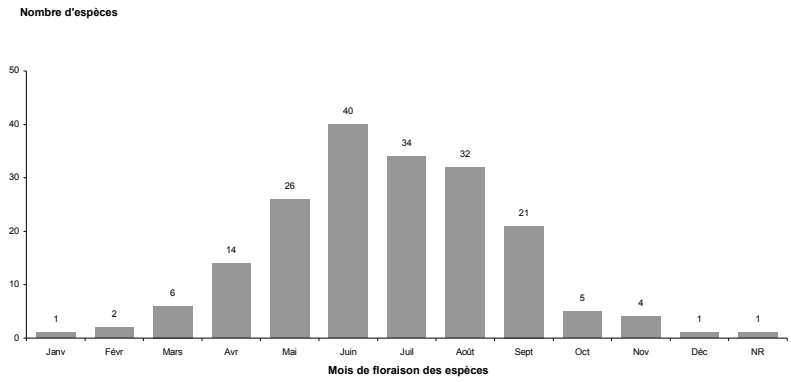


Figure 118 - Périodes de floraison des espèces du site du Goënidou (*NR : espèces non renseignées*)

Un seul taxon n'est pas renseigné sur sa période de floraison. Il apparaît sur cette figure que la floraison suit une courbe gaussienne. La plupart des espèces fleurissent d'avril à septembre comme c'est généralement le cas : il n'y a que très peu d'espèces fleurissant en

dehors de cette période. Environ trois quarts peuvent fleurir au mois de juin : c'est le mois où il y a le plus de floraisons potentielles.

Pour chaque relevé, les pourcentages d'espèces fleuries chaque mois ont été calculés et intégrés à l'AFM (fig. 119).

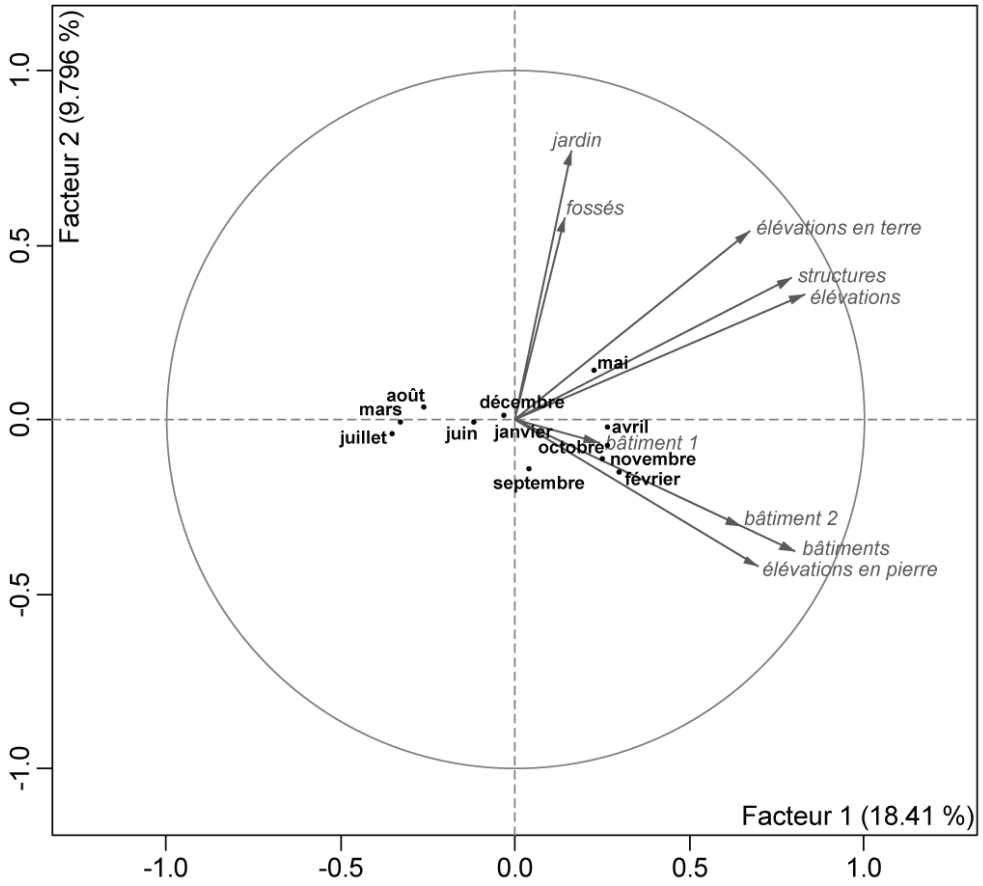


Figure 119 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des dates de floraison des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures

Il apparaît que ces variables sont peu liées au premier plan factoriel. Il semble toutefois y avoir des différences de périodes de floraison entre les structures et les zones non perturbées. Sur les bâtiments, il apparaît une plus forte proportion d'espèces à floraison précoce (février, avril, mai) et tardive (octobre, novembre). Au contraire, en dehors des structures, la part d'espèces fleurissant à la pleine saison (juin, juillet, août) est plus forte. Le mois de mars fait exception : la floraison est plus intense hors structures. Ceci ne représente cependant que six espèces. L'anémone et l'ajonc semblent influer sur cette position particulière du mois de mars : elles sont plus fréquentes que les quatre autres. C'est le problème des mois à faible part d'espèces fleuries : leur position est moins fiable. Il faut donc surtout retenir la plus forte proportion d'espèces fleurissant à la pleine saison hors structures.

- ***Résistance aux métaux lourds***

Enfin il est possible d'étudier les espèces du Goënidou en fonction de leur capacité de résistance aux métaux lourds (fig. 120). Ces caractéristiques sont tirées de la base Ecoflora.

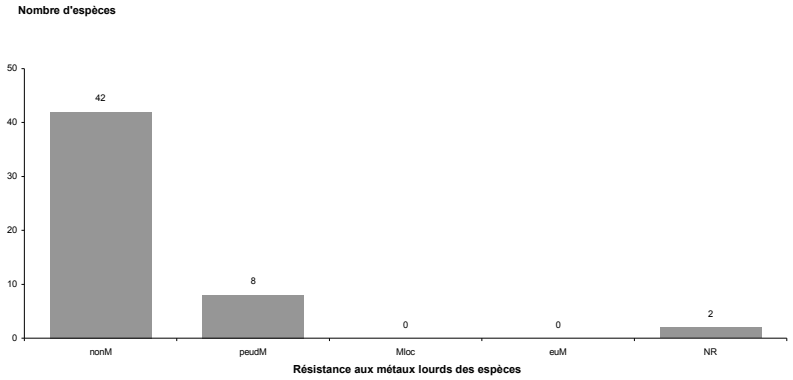


Figure 120 - Capacité de résistance aux métaux lourds des espèces du site du Goënidou (*nonM : non métallophytes ; pseudoM : pseudométallophytes ; Mloc : métallophytes locales ; euM : eumétallophytes ; NR : espèces non renseignées*)

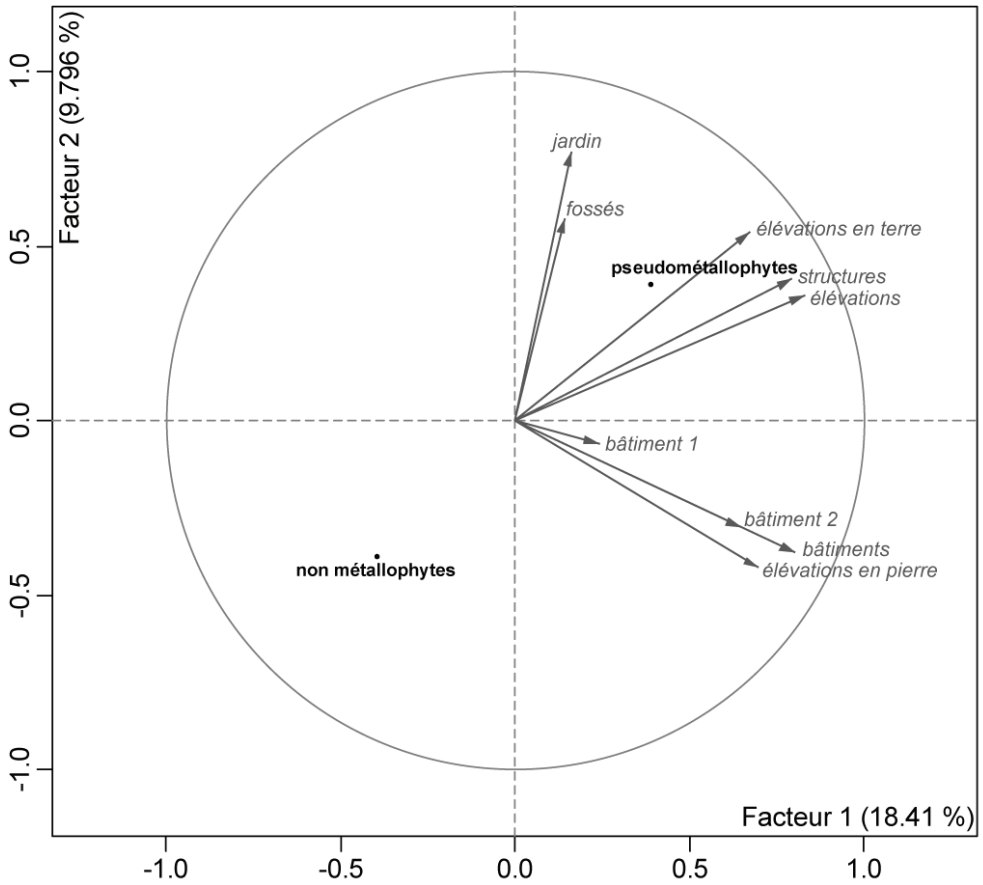


Figure 121 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des comportements face aux métaux lourds des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures

Pour deux espèces, aucun renseignement sur la résistance aux métaux lourds n'est disponible. Il ressort que la grande majorité n'a pas de capacité de résistance. Huit sont cependant des pseudométallophytes. Elles tolèrent la présence de métaux lourds. Sur le site, il n'y a pas de métallophytes locales ni d'eumétallophytes. Aucune n'est donc à proprement dit inféodée aux sols pollués à ces métaux. Toutefois, le pourcentage d'espèces tolérant la

présence de métaux lourds parmi les taxons renseignés est élevé (19%), par rapport à la proportion présentant ce caractère dans la base Ecoflora (inférieur à 3%).

Il est possible d'étudier la relation entre ces comportements et la présence de structures en projetant les variables de pourcentages de non métallophytes et de pseudométallophytes sur le cercle des corrélations de l'AFM (fig. 121).

Il apparaît que la proportion d'espèces pseudométallophytes est supérieure sur les structures et en particulier au niveau des zones agraires. A l'inverse, les non métallophytes ont une affinité pour les zones d'activité diffuse. Ces deux variables sont assez bien corrélées avec le premier plan factoriel de l'AFM.

9.1.1.2 Caractérisation du milieu (prédictions)

L'écologie des taxons peut aussi livrer des informations sur la nature du milieu grâce aux indices de prédiction (annexe 18). Leur moyenne pondérée par l'abondance des espèces a été calculée pour chaque relevé. Pour les indices de Gégout, une pondération supplémentaire a été apportée en fonction de l'amplitude de réponse des espèces autour de leurs valeurs d'optimum. La variabilité spatiale de ces indices moyens a été représentée sous la forme de cartes (annexe 19). Ces données sont synthétisées en les intégrant elles aussi dans l'AFM comme groupe supplémentaire (fig. 122). Cela permet d'analyser les relations entres ces indices de bioindication et les structures.

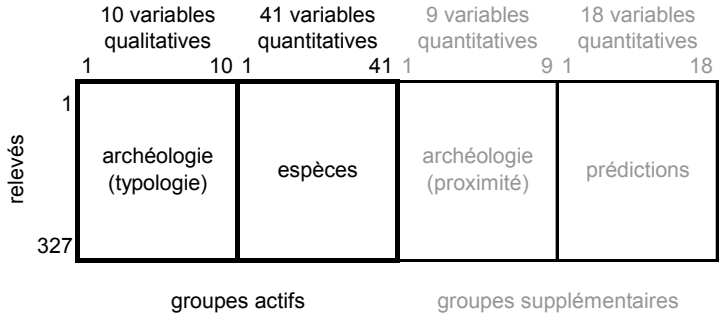


Figure 122 - AFM du Goënidou : structure des données utilisées pour l'analyse de prédiction de la flore

- ***Grime***

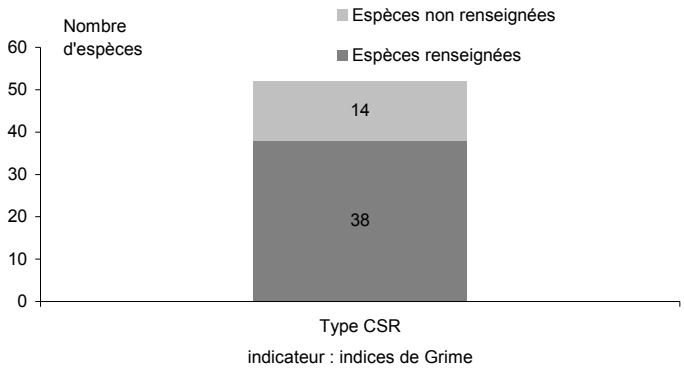


Figure 123 - Part des espèces du Goënidou renseignées pour les indices de Grime

L'impact des structures sur le milieu, en termes de perturbations, peut être abordé à travers les indices synthétiques de Grime. Ces indices ne sont pas exhaustifs. Tous les taxons ne sont pas renseignés. Pour connaitre la validité des indices moyens calculés, il est bon d'avoir un aperçu de la part d'espèces renseignées (fig. 123).

Un quart environ des espèces du site du Goënidou n'ont pas d'indices de Grime associés : c'est une part assez importante. Toutefois, vu que plus de la moitié des espèces est renseignée, il est possible de dire que les indices moyens calculés doivent rester assez fiables. Ils peuvent donc servir à analyser l'AFM (fig. 124).

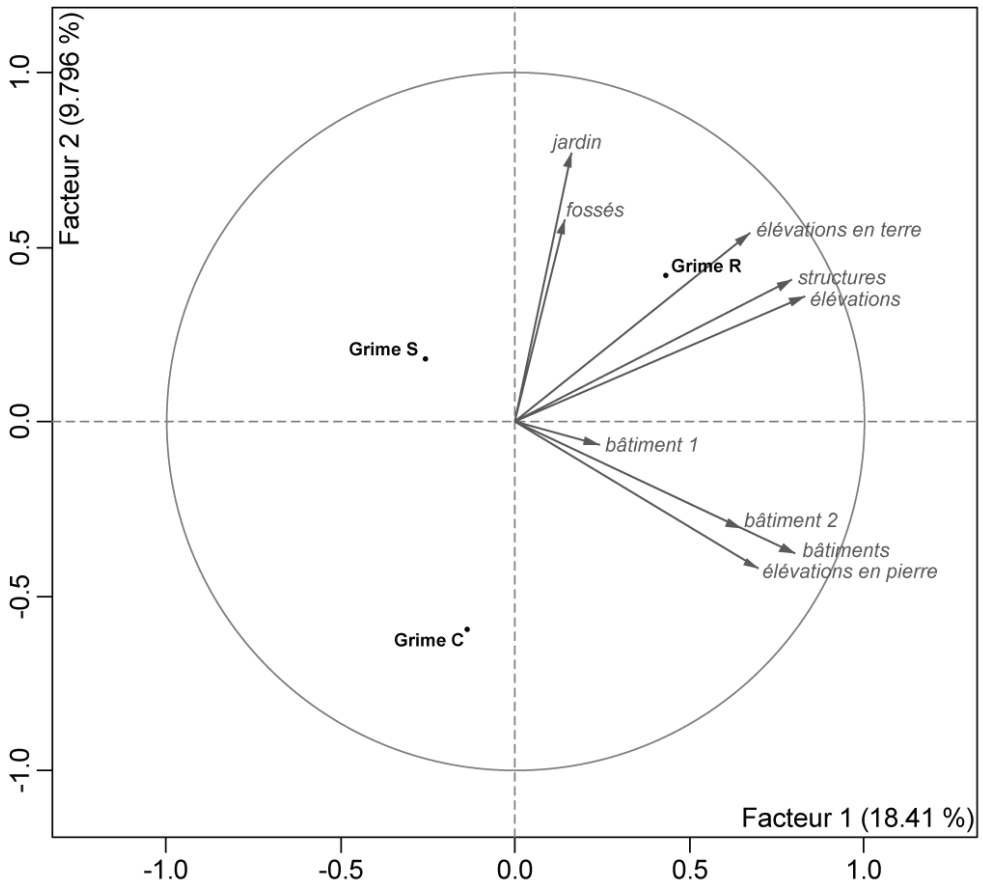


Figure 124 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens de Grime par rapport aux proximités aux différents types de structures

Les trois indices de Grime sont corrélés avec le premier plan factoriel. Sur les structures de manière générale, l'indice de rudéralité **R** est plus élevé. L'indice de résistance au stress **S** est légèrement majoré en dehors des bâtiments. L'indice de compétitivité **C** est nettement minoré au niveau des structures agraires.

- ***Ellenberg***

Il est ensuite possible d'étudier l'impact des structures sur l'environnement à travers les indices moyens d'Ellenberg. Comme pour les indices de Grime, il est bon de connaître la proportion d'espèces rentrant dans le calcul (fig. 125).

Pour tous les indices d'Ellenberg, seuls six taxons ne sont pas renseignés. Cela ne

représente qu'environ 10% des espèces. Les indices moyens peuvent donc être considérés comme fiables et être superposés sur le cercle des corrélations (fig. 126).

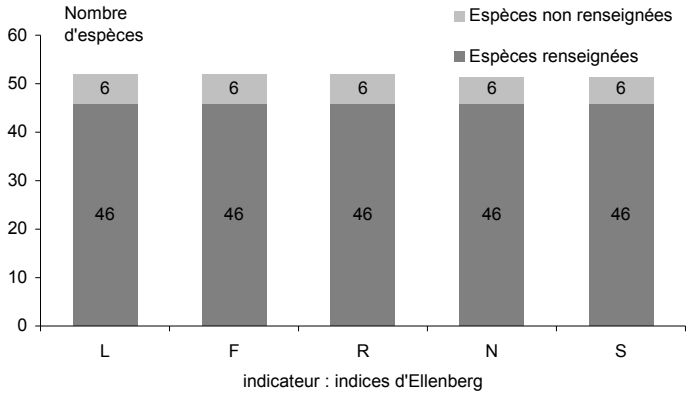


Figure 125 - Part des espèces du Goënidou renseignées pour les indices d'Ellenberg

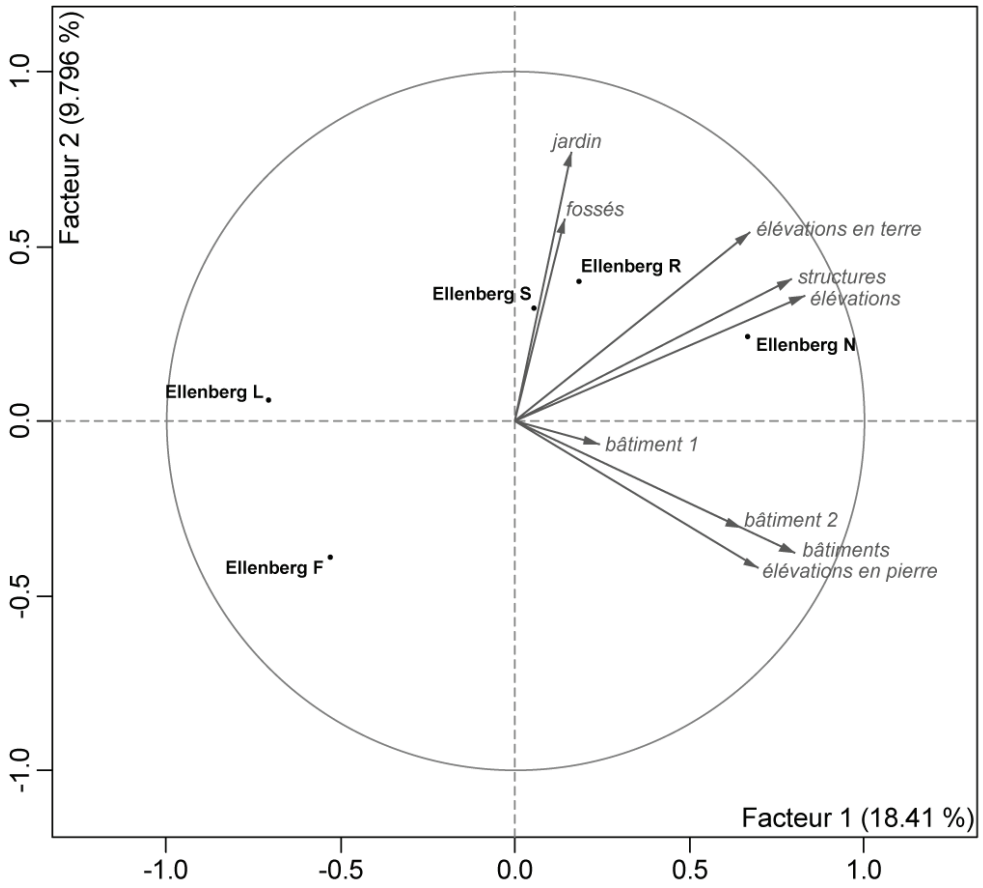


Figure 126 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens d'Ellenberg par rapport aux proximités aux différents types de structures

L'axe 1 de l'AFM est nettement corrélé aux indices **L** (fermeture du milieu), **N** (richesse du sol), et **F** (humidité du sol). Sur structures, les indices **L** et **F** sont plus faibles et l'Indice **N** plus élevé. La flore indique que le milieu y est plus fermé, plus sec et plus riche. L'axe 2 est légèrement corrélé aux indices **S** (salinité du sol) et **R** (acidité du sol). Ces indices sont

majorés sur les structures agraires. D'après la flore, les zones de jardin sont donc légèrement moins acides et plus « salées ».

- ***Gégout***

Pour caractériser l'impact des structures sur l'environnement de manière plus poussée, il est possible d'utiliser les indices moyens de Gégout. La proportion d'espèces renseignées sur lesquelles portent ces indices moyens doit d'abord être analysée (fig. 127)

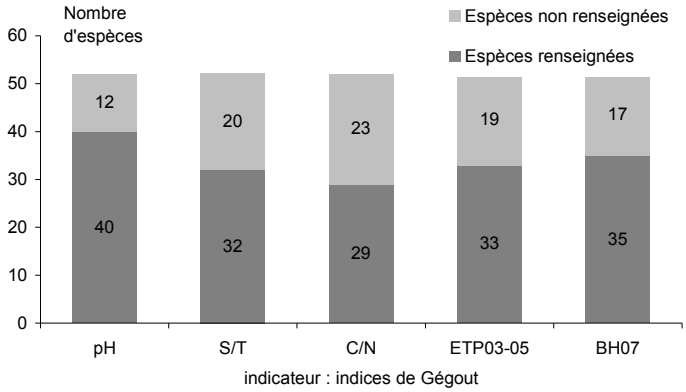


Figure 127 - Part des espèces du Goënidou renseignées pour les indices de Gégout

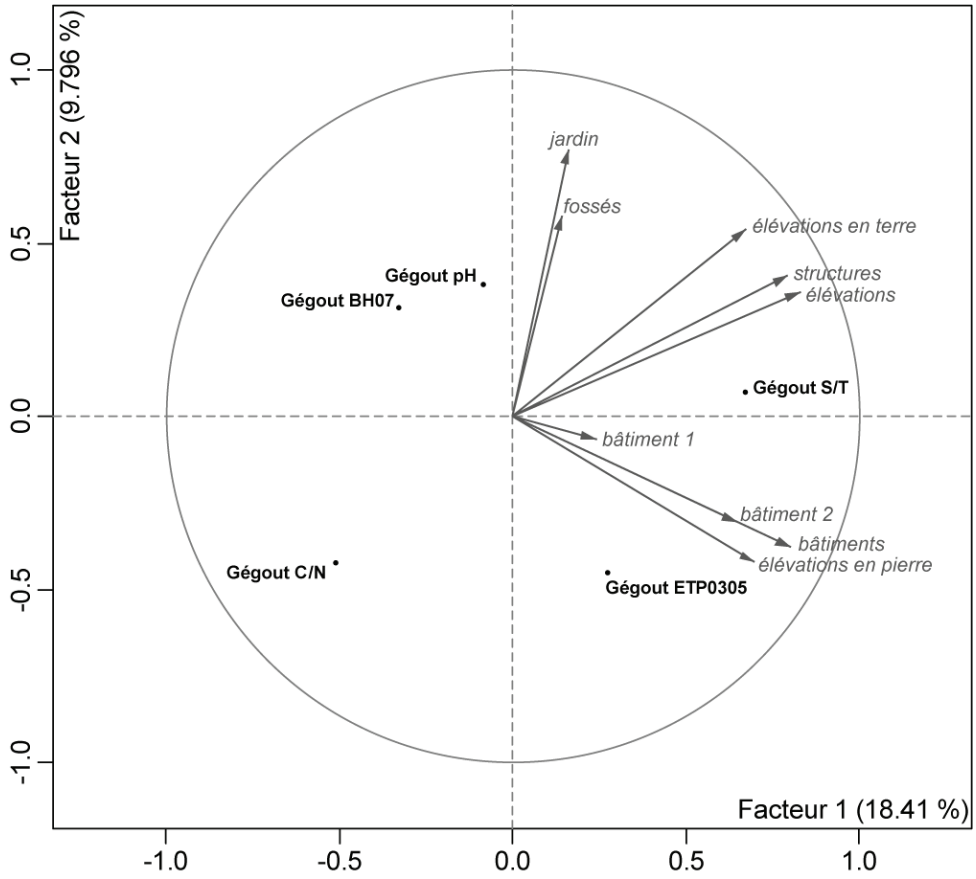


Figure 128 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens de Gégout par rapport aux proximités aux différents types de structures

La part de taxons documentés varie en fonction des indices. Pour l'indice de **pH**, seules 12 espèces n'ont pas d'information. En revanche, presque la moitié n'ont pas d'indice **C/N** associé : cet indice est particulièrement peu fiable. De manière générale, les espèces concernées par les indices de Gégout sont moins nombreuses que pour les indices de Grime et d'Ellenberg. En revanche, pour les indices synthétiques de Gégout, la moyenne est doublement pondérée : l'amplitude autour de l'optimum est intégré. Les indices moyens sont donc assez fiables même s'ils intègrent une part plus faible d'espèces dans leur calcul. Ils peuvent donc aussi aider à caractériser le milieu des structures (fig. 128).

Le cercle des corrélations montre que sur les structures, l'indice **S/T** est majoré alors que l'indice **C/N** est minoré. La différence est notamment très marquée pour l'indice **C/N**. La flore des structures affectionne les sols caractérisés par un S/T plus élevé et un C/N plus faible.

Les trois indices restant sont moins bien corrélés avec le premier plan factoriel de l'AFM. Ils sont tout de même assez liés à la proximité des bâtiments. Sur les bâtiments, l'indice **ETP0305** (évapotranspiration de mars à mai) est supérieur par rapport aux zones non bâties. Les indices **BH07** (bilan hydrique de juillet) et **pH** y sont au contraire plus faibles. La flore suggère que les propriétés hydriques sont différentes sur les bâtiments. Le bilan hydrique de juillet y serait plus faible et l'évapotranspiration de mars à mai plus forte. La végétation des jardins affectionne un pH du sol plus élevé.

- ***Hill***

Enfin, l'impact des structures sur l'environnement peut être approché à travers les indices moyens de Hill. Comme pour les autres indices, l'analyse commence par l'observation de la proportion d'espèces renseignées (fig. 129).

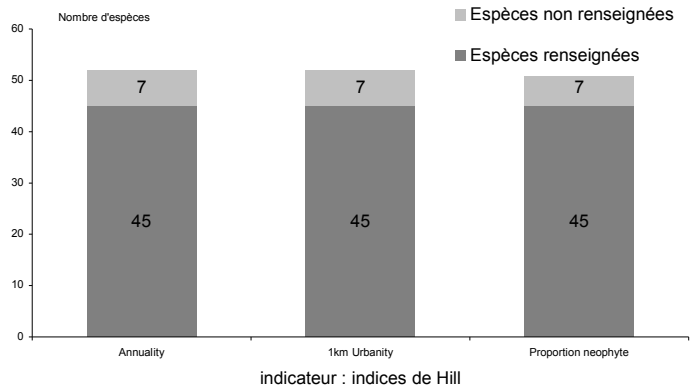


Figure 129 - Part des espèces du Goënidou renseignées pour les indices de Hill

Pour chaque indice de Hill, seuls les comportements de sept espèces n'ont pas été évalués. Cette part est assez faible : les indices moyens sont assez fiables. Il est possible de décrire le milieu des structures grâce aux indices moyens de Hill (fig. 130).

Les trois indices sont assez autocorrélés. Ils sont assez bien représentés dans le premier plan factoriel. Tous les trois sont majorés sur structures. La flore indique que les structures sont un milieu où il y a potentiellement plus d'espèces annuelles (**Annuality**) et plus de

néophytes (**Proportion neophyte**). Le milieu des structures apparaît aussi plus urbanisé (**1km urbanity**) d'après la flore.

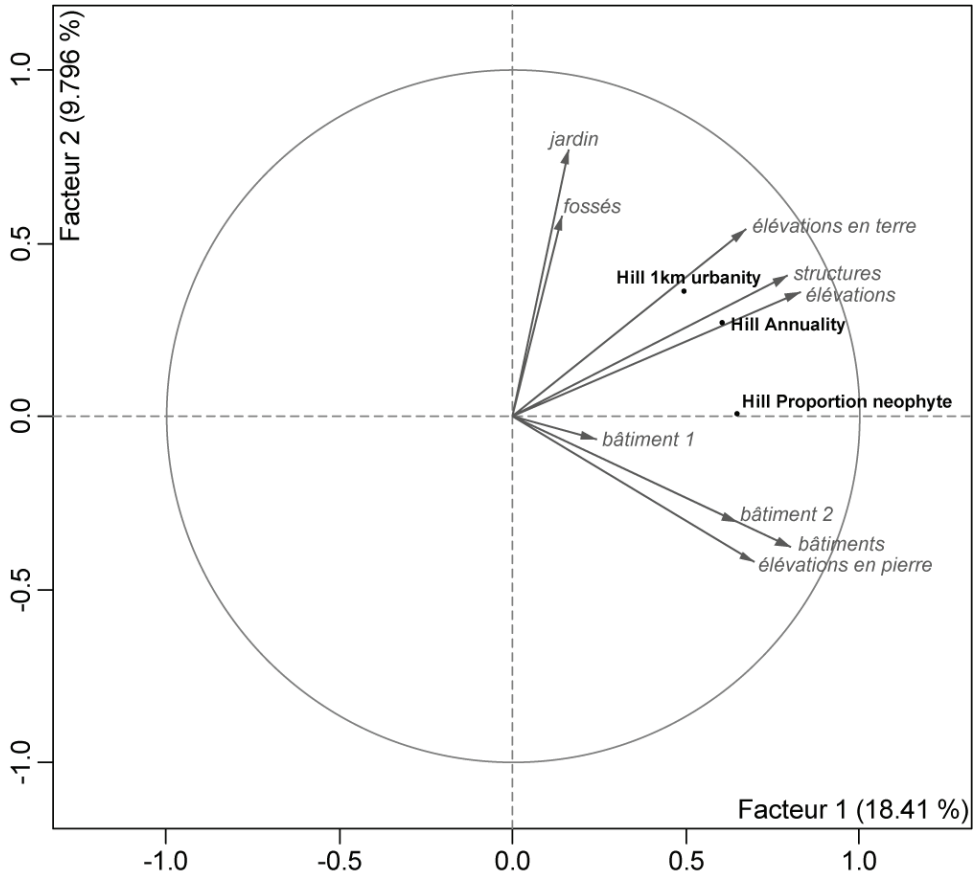


Figure 130 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens de Hill par rapport aux proximités aux différents types de structures

9.1.2 Discussion

9.1.2.1 Pas d'introduction d'espèce *a priori*

Sur le site du Goënidou, presque tous les taxons sont autochtones (fig. 110). Seule la scorsonère *Scorzonera humilis* a un statut douteux (fig. 111). Ce statut est propre à la base du BSBI. Cette plante a de grandes chances d'être native sur le continent. Il n'y a pas eu de naturalisations. Il peut toutefois y avoir eu des introductions d'espèces faisant déjà partie de la flore locale. La quasi-totalité des plantes recensées sont des plantes de landes. Il n'y a donc pas de doutes : elles n'ont pas été introduites. Un doute peut être porté sur la jonquille *Narcissus peudonarcissus*. Elle affectionne normalement plus les prairies, les boisements et les falaises maritimes. Ce n'est pas une espèce de landes : elle est en dehors de son milieu. Elle est souvent plantée à proximité des bâtiments : c'est une ornementale. On la trouve spécifiquement autour des bâtiments : elle peut avoir été introduite et avoir perduré depuis. Il est toutefois difficile de confirmer cette hypothèse. Les usages ornementaux passés ne sont pas forcément identiques aux actuels. Sa culture actuelle à but ornemental se fait par multiplication des bulbes. Ce sont donc les mêmes individus. Dans le cas d'une introduction

ancienne, il y a de fortes présomptions que la même démarche ait été effectuée et que tous les individus plantés soient des clones. Ils doivent alors avoir le même patrimoine génétique. Toutefois, la jonquille n'a pas qu'un mode de reproduction végétatif : elle produit aussi des graines viables. Il arrive parfois que certaines populations ne produisent pas de graines (Caldwell & Wallace, 1955). Ce n'est pas le cas ici, des capsules en contenant ont pu être observées. Il y a donc reproduction sexuée des pieds du site. Il n'est donc pas possible de réaliser des analyses génétiques pour prouver l'introduction de la jonquille. Le vent ou des chocs contre la capsule aide la dispersion des graines. Celle-ci se réalise généralement sur de faibles distances (Caldwell & Wallace, 1955). Cette mauvaise propagation va dans le sens d'une espèce relictuelle. Elle n'a pas pu coloniser le milieu environnant son lieu d'introduction. La jonquille étant en dehors de son habitat habituel, la forte acidité du sol peut aussi ne pas être adaptée à la germination de ses graines. Il n'y a pas d'informations à ce sujet. La propagation n'est peut-être finalement que végétative. Des tests de germination peuvent être réalisés *in situ*. Dans le cas d'un échec total de cette multiplication, des tests génétiques pourraient éventuellement être envisagés pour répondre aux questions d'introduction de cette plante sur le site.

9.1.2.2 Présence d'espèces favorisées par les activités humaines

- ***Pas d'espèce reflétant une sélection humaine***

Certaines espèces ont pu être favorisées directement par les occupations humaines. D'autres espèces que la jonquille ont des propriétés qui ont pu motiver une introduction. La serratule *Serratula tinctoria* est utilisée en teintures, les baies du prunellier *Prunus spinosa* et du sorbier *Sorbus accuparia* peuvent être consommées. Toutefois, ce sont des espèces courantes elles sont dans leur milieu naturel. Elles n'ont pas été acclimatées. Elles ont en revanche pu être amenées par l'homme au niveau du site ou avoir été épargnées par les usages humains passés du fait de leur utilité. Le prunellier et le sorbier sont des arbustes. Les pieds observés ici sont de très faibles dimensions : ils sont très peu âgés. Il n'y a aucun vieux spécimen. Leur apparition sur le site semble récente. Il n'y a donc pas de lien direct avec les occupations passées.

- ***Pas d'espèces apportées par des animaux liés aux activités humaines***

La proportion de zoochores est plus importante sur les bâtiments (fig. 115). La majorité des plantes caractéristiques des zones bâties est dispersée par les oiseaux. Elles possèdent des baies charnues comme le lierre, le chèvrefeuille ou la myrtille. Les pieds de ces végétaux sont tous de faibles dimensions. Ils ne forment pas de souches ou de grandes étendues, caractéristiques d'individus âgés. Ils ont été introduits sur les bâtiments par des animaux, mais sûrement pas à l'époque de l'occupation. Ces vecteurs ne peuvent donc être qualifiés de commensaux. L'apport par des animaux domestiques peut aussi être exclu.

- ***Présence d'espèces liées aux perturbations humaines***

L'homme a créé des perturbations qui peuvent être abordées par les indices de Grime

(fig. 124). D'après J.-P. Grime, il existe deux types d'évènements affectant la flore : la perturbation qui détruit la végétation et le stress qui diminue la production végétale.

Sur les bâtiments, le stress est un peu moindre. Le milieu est plus propice aux végétaux. Ce constat est à rapprocher des analyses chimiques. Toutefois l'analyse des cartes montre que la réponse de l'indice **S** de Grime est peu marquée. L'indice est élevé dans le bâtiment 2.

Sur les structures, la perturbation semble plus importante : l'indice **R** est élevé, en particulier aux structures agraires. La végétation y est plus rudérale. Au niveau des bâtiments, cette rudéralité peut être expliquée par la présence des éboulis de murs et donc des taux de pierrosité élevés. Au niveau des structures agraires où elle est plus importante, seuls les labours peuvent expliquer cette rudéralité. Or ces labours et ces éboulis anciens n'ont plus d'impacts. Il n'y a plus de destruction de la flore, il n'y a plus de perturbations. Les variations des indices **S** et **R** ne semblent donc pas bien être explicables par la présence de structures.

Les perturbations sont aussi abordées par les indices de Hill : ils sont spécifiques des activités humaines actuelles. Ces trois indices sont nettement majorés sur les structures (fig. 130). Sur ce site, la flore des occupations anciennes est caractéristique des activités humaines.

- ***Certaines modifications du milieu sont à l'origine des différences de flore***

Si les espèces ont pu être favorisées, cela ne peut être qu'indirectement, par modification durable de l'environnement. Les analyses chimiques de sol ont démontré cet impact (Cf. 8.1). Sur les bâtiments, le sol est plus riche en nutriments et a une meilleure rétention d'eau l'été. L'acidité est réduite, la toxicité aluminique est moindre. Une flore adaptée a pu se développer sur ces sols aux propriétés modifiées. Les indices d'Ellenberg et de Gégout abordent la réponse de la végétation à ces changements (fig. 126 et 128).

Pour l'humidité, la prédiction de la flore par l'indice **F** d'Ellenberg est opposée aux mesures sur prélèvements. Cette inversion peut avoir plusieurs causes. La flore peut ne pas du tout refléter les variations d'humidité mais d'autres facteurs. Les mesures d'humidité réalisées sur des prélèvements effectués en été peuvent ne pas refléter la tendance générale des sols sur l'année. Cette dernière hypothèse semble valable. La carte de l'indice **L** d'Ellenberg montre de très faibles valeurs sur les structures en élévation : la flore y indique un sol plus sec. Ce constat est tout à fait logique. Ces structures sont encore visibles en microtopographie. Le drainage y est donc plus important qu'ailleurs. La flore ne prédit donc pas des valeurs aberrantes. Les valeurs mesurées montrent pour leur part un taux d'humidité plus fort au niveau des zones d'activité domestique. Cette humidité ne peut être expliquée par la topographie et les écoulements. Elle renseigne plus sur la rétention de l'eau en été. Les sols plus organiques retiennent mieux l'humidité. L'information est donc différente. La flore peut être liée à une modification de la topographie bouleversant les écoulements.

La flore des structures a clairement une affinité pour les milieux plus riches : les indices **N** d'Ellenberg et **S/T** de Gégout sont plus élevés. Cette observation va dans le sens des analyses chimiques pour la richesse du sol. La modification de richesse du milieu a donc un rôle évident sur la végétation.

L'indice **C/N** de Gégout est plus faible sur structures agraires exactement comme l'avaient montré les mesures. Les affinités de la flore reflètent bien le milieu : la minéralisation des humus joue un rôle majeur sur les différences de flore observées.

La flore des zones d'activité agraire a une préférence pour les milieux légèrement moins acides : les indices **R** d'Ellenberg et **pH** de Gégout sont plus élevés. Ces variables vont à l'encontre des valeurs mesurées : l'acidité réelle (pH_{eau}) est plus faible sur ces structures (Cf. 8.1). Il avait été émis des doutes sur cette mesure. La flore semble le prouver car les deux indices sont concordants. Il y aurait un rôle de l'acidité même si les valeurs mesurées ne le prouvent pas. Le pH n'est pas stable dans le temps : il est soumis à des variations saisonnières voire journalières. Les valeurs mesurées ne reflètent qu'un aperçu de l'acidité à un instant donné. Les indices de bioindication tendraient à montrer que l'acidité est réduite sur les zones d'activité agraire.

N'étant pas en milieu halin, l'indice de salinité **S** d'Ellenberg n'a aucun intérêt et ne révèle aucun phénomène explicable.

Les indices d'évapotranspiration **ETP0305** et de bilan hydrique de juillet **BH07** de Gégout ne reflètent pas vraiment le milieu mais plutôt la dynamique de la végétation.

La modification des sols peut aussi avoir concerné des éléments non mesurés. Les activités humaines, notamment métallurgiques accumulent des métaux lourds. Or d'assez nombreuses scories de métallurgie du fer ont été trouvées lors de sondages réalisés aux alentours. La proportion de pseudométallophyte est plus importante sur les zones d'activité agraire (fig. 121). Les espèces y ont plus de capacité de résistance aux métaux lourds. Il peut y avoir eu des amendements de ces zones avec des scories. Celles-ci sont réputées pour améliorer les sols en les aérant mais aussi en les enrichissant en minéraux.

9.1.2.3 La flore reflète un stade dynamique différent

- ***Observation d'une fermeture du milieu sur les bâtiments***

Sur les structures, l'indice **L** d'Ellenberg est nettement plus faible (fig. 125). Les espèces sont caractéristiques de milieux plus ombragés. L'étude des types biologiques confirme cette fermeture du milieu (fig. 113) Il y a plus de taxons arbustifs (méga-méso-microphanérophytes). Les géophytes à bulbes sont aussi bien représentés. Ce type tolère assez bien les milieux fermés : les espèces se développent tôt en saison avant la sortie du feuillage des ligneux et peuvent bénéficier d'un peu de lumière. Lorsque le feuillage des strates supérieures est développé et fait de l'ombre, elles ont souvent déjà fini leur cycle.

Cette fermeture du milieu peut être due à un abandon des bâtiments plus précoce que celui des parcelles attenantes. Cette hypothèse est difficilement vérifiable. Même la fouille peut difficilement résoudre cette question.

- ***Observation d'espèces végétales à dispersion rapide sur les bâtiments***

Les différences de vitesses de colonisation des espèces peuvent expliquer la présence d'un stade plus évolué de la végétation sur les bâtiments. Dans les zones non perturbées, la

dispersion se fait par l'intermédiaire des fourmis, par des mécanismes de projection des graines ou par simple gravité (fig. 115). Ils ne permettent pas la diffusion à grande distance des graines. Ce sont de faibles colonisatrices. La flore des zones bâties est caractérisée par un mode de dispersion particulier : la zoochorie. Les ligneux présents sur les bâtiments ont pour la plupart des baies. Celles-ci sont généralement mangées par les oiseaux (endoornithochorie). Ils permettent une dispersion à longue distance des graines. Ils ne dispersent pas au hasard les graines contrairement au vent : les anémochores sont indifférentes aux structures. Les oiseaux, vecteurs potentiels, digèrent les baies ingérées puis excrètent les graines avec les fèces. Leurs activités ne sont pas spatialement homogènes. Les graines sont diffusées au niveau des lieux les plus fréquentés et notamment les endroits où les volatiles se posent. La répartition des espèces végétales en question est spécifiquement sur les bâtiments. Deux hypothèses sont possibles : les graines ont été disséminées un peu partout mais toutes n'ont pu germer faute d'un sol adapté ou leur dispersion s'est fait spécifiquement au niveau des bâtiments. Les propriétés du sol des bâtiments sont différentes : la toxicité aluminique y est moindre (Cf. 8.1). L'aluminium bloque le développement racinaire de nombreuses espèces : les graines dispersées en dehors ne sont pas forcément adaptées à germer dans de telles conditions. La première solution est donc envisageable. Les oiseaux se perchent de préférence dans des endroits hauts pour mieux surveiller leur environnement et l'arrivée d'éventuels prédateurs. Les bâtiments en ruine offrent de telles situations. Ils sont ainsi un lieu de prédilection de digestion pour les volatiles et donc de dispersion des graines. Les deux hypothèses sont ainsi valables. La deuxième offre une possibilité d'accentuation du phénomène. Les espèces concernées sont des ligneux. Une fois développés, ils offrent un site encore meilleur de perchage. La fermeture du milieu est d'autant plus accélérée.

- ***Présence d'un saut de successions végétales dû à l'enrichissement du sol***

Ces phénomènes induisent un saut de successions végétales au niveau des structures. Il a été démontré que les occupations anciennes ont enrichi le milieu en nutriments et en matière organique (Cf. 8.1). Or cet enrichissement peut être à l'origine d'un saut dans les successions végétales selon l'hypothèse de ressource-ratio de D. Tilman (Tilman, 1985). Cette théorie semble ici pleinement se démontrer. La flore des structures est une flore de milieux plus fermés mais aussi plus riche comme le montrent les indices d'Ellenberg **L** et **N** (fig. 126). Les indices **S/T** et **C/N** de Gégout confirment cette affinité de ce milieu plus fermé pour les sols plus riches (fig. 128).

9.1.2.4 Influence nette de la compétition interspécifique

- ***Présence d'espèces non compétitives au niveau des structures agraires***

Les indices de Grime sont des pourcentages d'énergie allouée aux différentes stratégies. Les mauvaises corrélations entre les indices **S** et **R** et les structures peuvent être expliquées par la compétitivité. Elle est plus faible sur structures agraires (fig. 124). Comme il avait été observé, ces structures sont caractérisées par l'absence d'espèces dominantes de la strate

herbacée et par une diversité plus élevée (Cf. 7.2). L'indice **C** confirme que les espèces caractéristiques des zones agraires sont peu compétitives. Elles fuient clairement les espèces dominantes.

Les indices de Gégout **ETP0305** et **BH07** sont plus liés à ces zones agraires (fig. 128). En dehors de cette aire d'activité, le bilan hydrique de juillet est plus négatif et l'évapotranspiration de mars à mai plus importante. Ces indices reflètent la plus forte productivité végétale des espèces dominantes. Ils vont dans le sens d'une plus forte compétition sur les zones d'activité diffuse et domestique.

Les modes de reproduction confirment aussi ces phénomènes de compétition (fig. 117). En dehors des aires d'activité agraire, la reproduction végétative est favorisée. Ce type de reproduction est caractéristique des espèces compétitives.

- ***Etalement de la floraison des espèces sur structures***

Hors structures, les espèces fleurissent principalement l'été (fig. 119). Les structures sont caractérisées par un étalement de la période de floraison : il y a plus d'espèces vernales et automnales. Ce phénomène est caractéristique d'un partage temporel de niche sur les structures. Il est peu marqué mais quand même présent. Il peut être dû à la plus forte compétition sur les bâtiments. Le même phénomène devrait normalement être observable sur les zones diffuses à Molinie. Ces zones sont caractérisées par un milieu toxique et peu nutritif. La plupart des espèces le fuient. Au contraire, les bâtiments sont plus attractifs. La houlque et la fougère rendent toutefois difficile l'accès de ce milieu aux autres espèces. Certaines ont réussi à passer outre en ayant un cycle biologique décalé. C'est le cas des géophytes à bulbes (jonquille et jacinthe) qui poussent sur les structures au printemps. La présence de plus d'espèces à floraison tardive est pour sa part liée au lierre. Il est vivace : ce décalage de floraison ne reflète pas un partage temporel de niche. C'est une espèce avec un cycle de développement complètement décalé qui serait attribuable au fait que c'est une espèce du tertiaire (Metcalfe, 2005).

9.2 Groix

9.2.1 Résultats

Comme pour le site du Goënidou, l'écologie des espèces est abordée. Cela sert à déterminer la nature du lien entre les occupations archéologiques et la végétation.

9.2.1.1 Caractérisation de la flore (descriptions)

L'analyse écologique passe avant tout par l'étude des traits biologiques des espèces (annexe 20). A chaque relevé, les pourcentages d'espèces pour chaque modalité de ces caractéristiques ont été calculés. La variation spatiale de ces variables a été abordée à l'aide de cartes (annexe 21).

Ces cartes ont été synthétisées en intégrant ces données à l'AFM. Les modalités présentant une variance nulle ont été éliminées. La matrice résultante (descriptions) a été directement insérée dans l'AFM en tant que groupe supplémentaire (fig. 131).

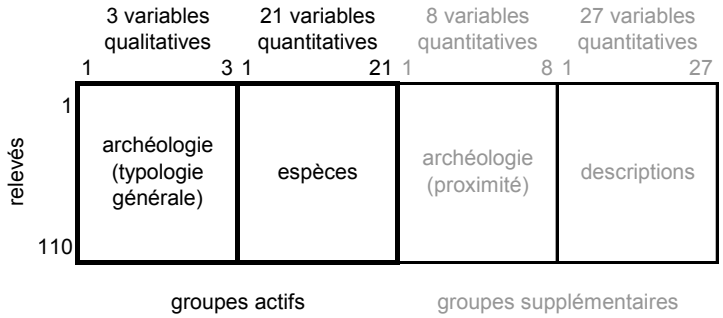


Figure 131 - AFM de Kervédan : structure des données utilisées pour l'analyse des traits biologiques

Pour rappel, l'axe 1 de l'AFM permet de mettre en évidence des différences de flore entre les relevés sur structures en creux et les relevés hors structures. Le deuxième facteur révèle des différences floristiques entre les différents sondages suivant un gradient est/ouest (Cf. 7.3.1.4). Du point de vue de la physico-chimie des sols, la présence d'une flore particulière sur structures semble en partie liée à un taux d'humidité plus élevé et à un sol présentant moins d'éléments grossiers. Les autres propriétés chimiques sont corrélées avec l'axe 2. Le gradient est/ouest observé dans la flore est en fait lié à un fort gradient chimique. L'ouest de l'éperon est nettement enrichi par les apports éoliens et les embruns. Le pH y est plus élevé ainsi que les concentrations en phosphore, en sodium et en cations dits basiques de manière générale. (Cf. 8.2). Voyons à présent comment la nature de la végétation s'organise face à toutes ces différences.

- ***Statut***

Le statut des espèces est tout d'abord analysé. L'étude des données brutes de la base du BSBI est réalisée (fig. 132).

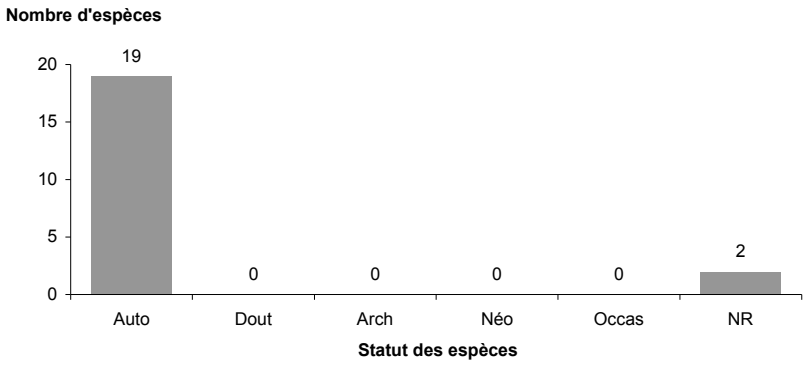


Figure 132 - Statut des espèces du site du Goënidou (Auto : autochtones ; Dout : statut douteux ; Arch : archéophytes ; Néo : néophytes ; Occas : allochtones acosionelles ; NR : espèces non renseignées)

Sur les 21 espèces étudiées, seules deux ne sont pas renseignées. Toutes les autres sont données comme autochtones. Il n'y a pas de taxons introduits. Tous font partie de la flore locale. Etant donné ce constat, il est inutile d'aller plus loin dans l'analyse. De plus, les pourcentages ont une variance nulle (0 ou 100% dans l'ensemble des relevés) et ne font pas partie des variables introduites dans l'AFM.

- ***Types biologiques***

Les types biologiques consignés dans la base Plantatt peuvent aussi renseigner sur l'origine des différences de flore observées. Les données brutes sont tout d'abord analysées (fig. 133).

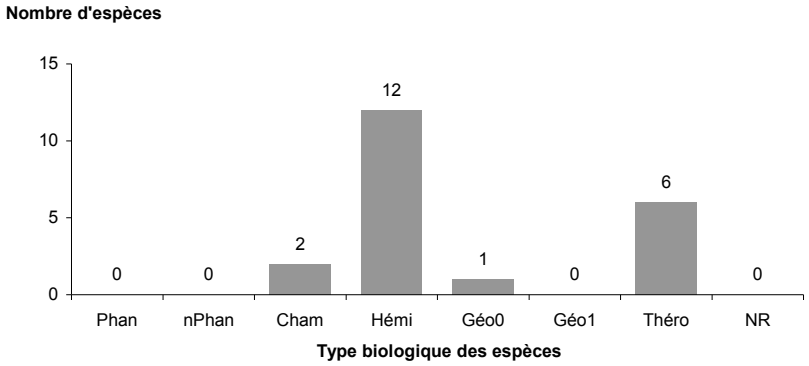


Figure 133 - Types biologiques des espèces du site de Kervédan (*Phan : méga-méso-microphanérophytes ; nPhan : nanophénérophytes ; Cham : chaméphytes ; Hémi : hémicryptophytes ; Géo0 : géophytes non bulbeuses ; Géo1 : géophytes bulbeuses ; Théro : thérophytes ; NR : espèces non renseignées*)

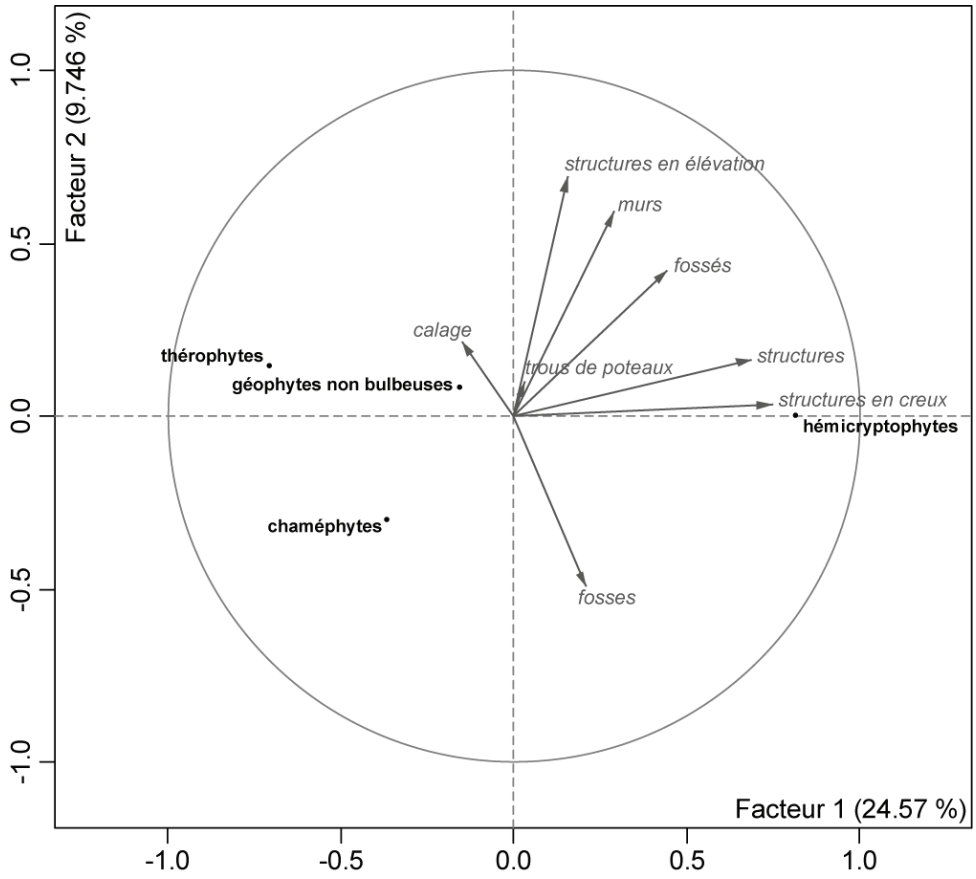


Figure 134 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des types biologiques des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures

Toutes les espèces sont renseignées sur leur type biologique majoritaire. Il existe deux grands types parmi les espèces de ce site. Les espèces ayant leurs bourgeons au ras du sol

(hémicryptophytes) sont les plus fréquentes. Elles représentent plus de la moitié des espèces. Les plantes annuelles (thérophytes) sont le deuxième type majoritaire avec six espèces. Les trois espèces restantes sont classées parmi les ligneux bas (chaméphytes) et les plantes à bourgeons souterrains (géophytes). Il n'y a pas de géophytes à bulbes. Etant dans un milieu ouvert, il n'y a pas non plus d'arbres et arbustes (phanérophytes). La variabilité des types biologiques est donc assez pauvre sur ce site. Chaque type biologique présent est projeté dans l'espace des variables de l'AFM (fig. 134).

Il apparaît une nette corrélation des deux types majoritaires avec l'axe 1. Sur les structures en creux, il y a dominance des espèces hémicrytophytes. En dehors, les espèces annuelles (thérophytes) sont plus fréquentes. Les géophytes non bulbeuses sont peu corrélées avec le premier plan factoriel. En revanche, les chaméphytes occupent une place nettement négative sur les deux axes. Toutefois, ce groupe n'est représenté que par l'orpin *Sedum anglicum* et l'armérie *Armeria maritima*. La place particulière des chaméphytes sur le cercle des corrélations est explicable par le fait que l'orpin pousse à distance des structures et l'armérie dans la partie ouest de l'éperon. Ce n'est donc pas révélateur des chaméphytes de manière générale.

- ***Modes de dispersion***

Comme sur le site du Goënidou, les modes de dispersion des espèces sont étudiés (fig. 135).

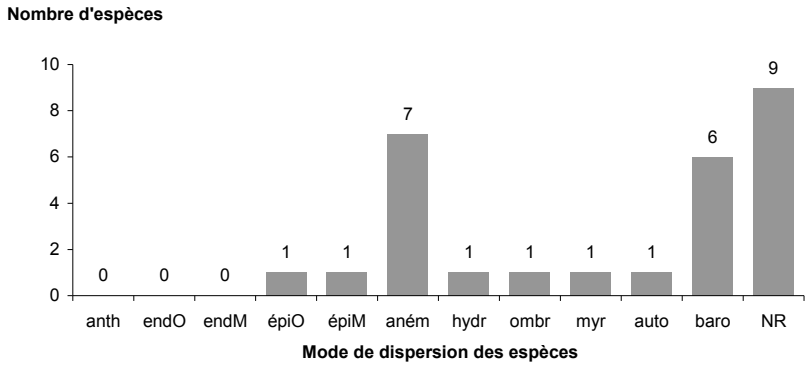


Figure 135 - Modes de dispersion des espèces du site de Kervédan (*anth : anthropochores ; endO : endoornithochores ; endM : endomammochores ; épiO : épiornithochores ; epiM : épimammochores ; aném : anémochores ; hydr : hydrochores ; ombr : ombrochores ; myr : myrmécochores ; auto : autochores ; baro : barochores ; NR : espèces non renseignées*)

Pour presque la moitié des espèces, le mode de dispersion n'est pas référencé. Il existe deux modes principaux de dispersion des graines sur ce site : elles peuvent être disséminées par le vent (anémochorie) ou tomber directement au sol par effet de gravité (barochorie). Ces deux types sont sensiblement représentés par le même nombre d'espèces. Les autres modes sont inexistants ou représentés par seulement un taxon.

Les deux modes de dispersion principaux sont nettement corrélés à l'axe 1. La proportion de barochores est plus élevée sur les structures en creux. Au contraire, les anémochores sont plus courantes en dehors. Les autres types de dispersion ne sont représentés que par des

espèces isolées. La place de ces modalités sur l'AFM n'est donc pas représentative d'autant que le nombre d'espèces non référencées est assez élevé.

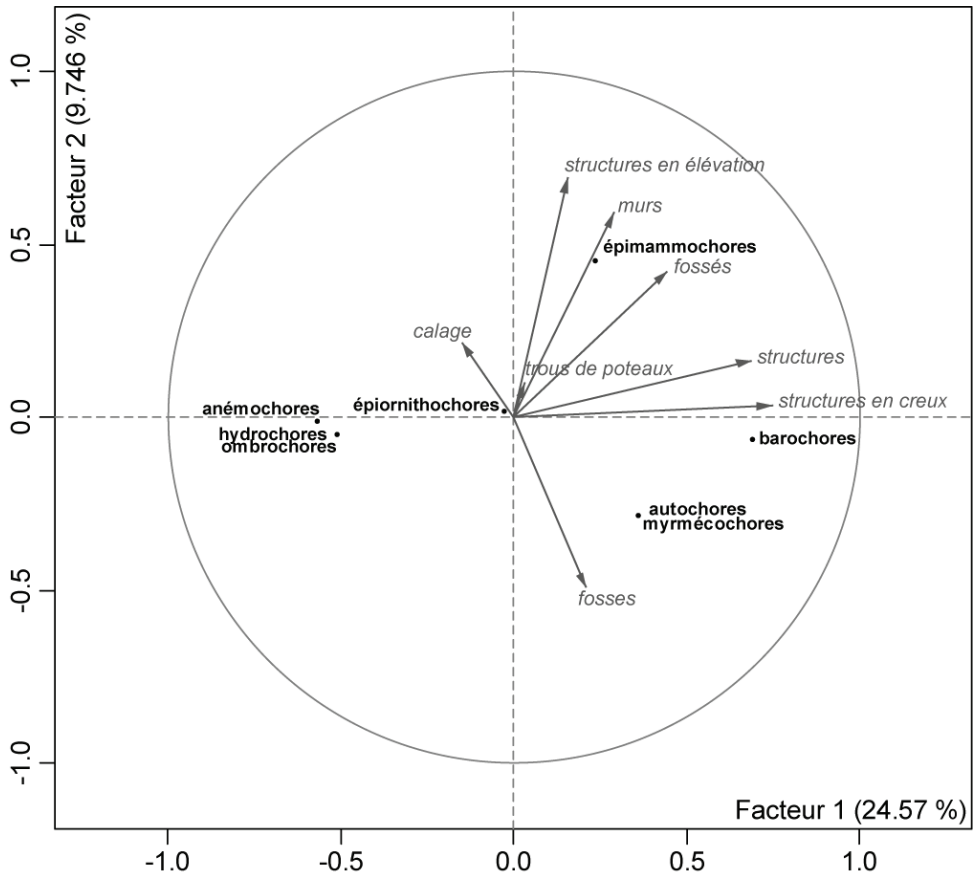


Figure 136 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des modes de dispersion des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures

- ***Mode de multiplication***

La multiplication des plantes peut aussi se faire de manière végétative. Les espèces ont développé des stratégies de multiplication sexuée et végétative exclusives ou mixtes. Les modes de multiplication des espèces du site de Groix sont résumés par la figure 137.

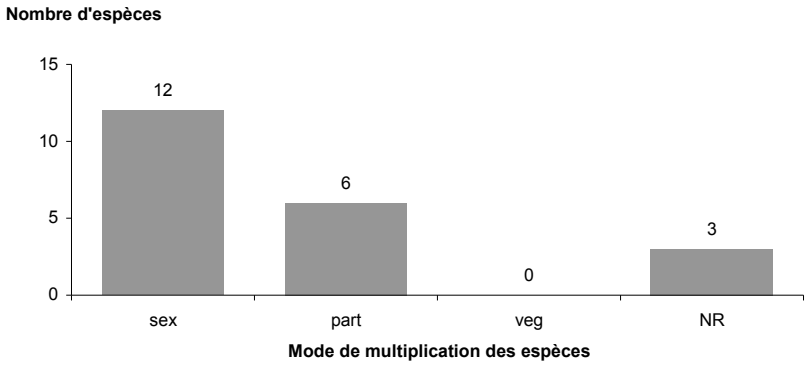


Figure 137 - Modes de multiplication des espèces du site de Kervédan (*sex : reproduction sexuée ; part : reproduction partagée(sexuée et végétative) ; veg : veproduction végétative ; NR : espèces non renseignées*)

La base Ecoflora attribue un comportement à la majorité des taxons. Il n'y a pas d'espèces à multiplication végétative exclusive. La majorité a une multiplication exclusivement sexuée. Certaines ont une multiplication de type partagé. Ces variables sont projetées dans l'AFM (fig. 138).

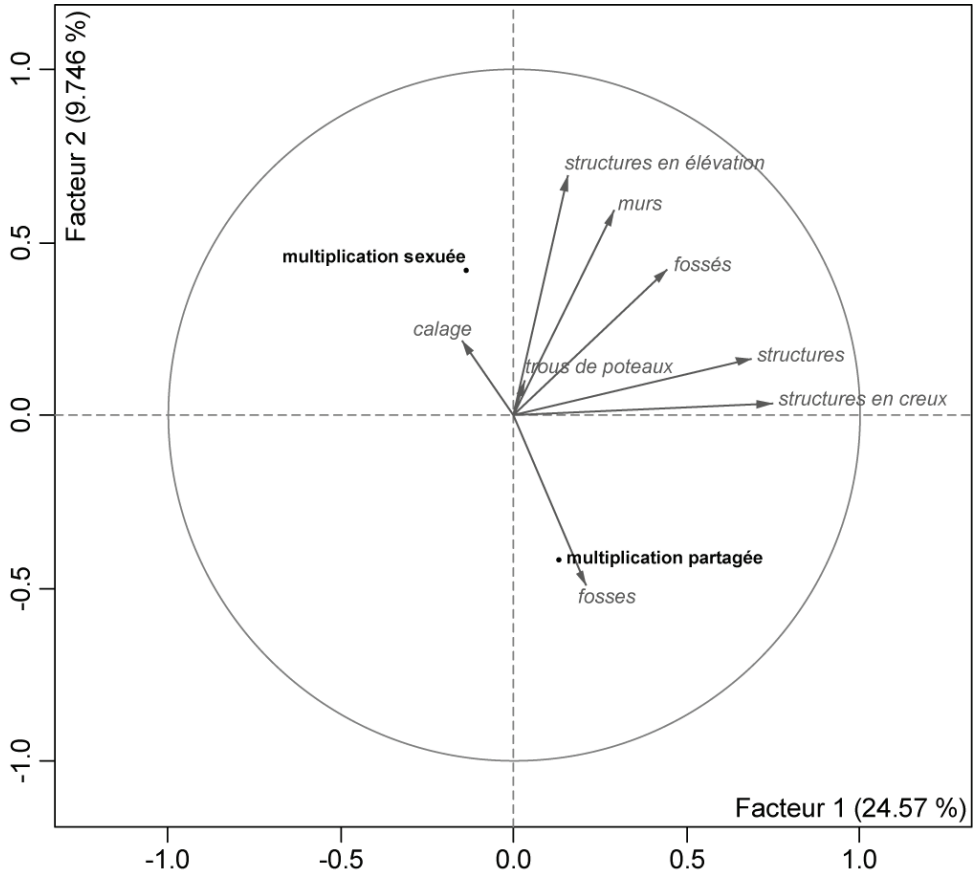


Figure 138 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des modes de multiplication des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures

Il n'apparaît pas de différences significatives sur l'axe 1. En revanche, l'axe 2 semble bien discriminer les deux modes de multiplication des espèces. Dans la partie ouest de l'éperon, les espèces ont une multiplication de type partagée. Dans la partie est, les espèces présentes sont plus des taxons ayant une tendance à la multiplication sexuée.

- ***Période de floraison***

Les espèces sont ensuite analysées à travers leurs périodes de floraison (fig. 139).

Pour tous les taxons, il existe des informations sur leur période de floraison dans la base Ecoflora. Comme pour le site du Goënidou, on observe une floraison des espèces suivant un mode centré sur la période estivale. En juin/juillet, presque la totalité est potentiellement en fleur. En revanche, en dehors de la période mai/septembre, presque aucune ne fleurit.

La part d'espèces fleuries par mois est utilisée comme facteur explicatif de l'AFM (fig. 140).

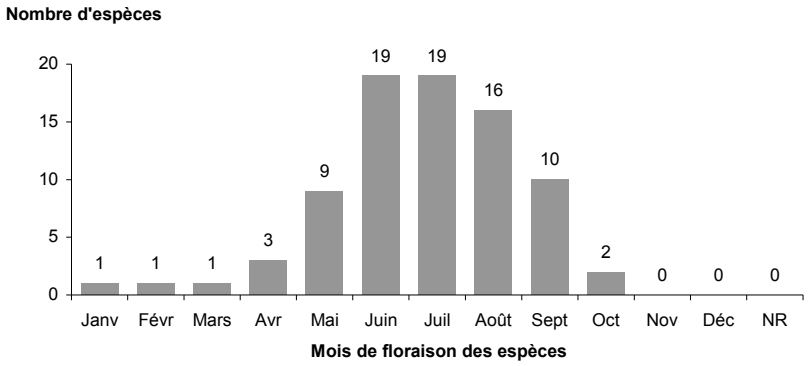


Figure 139 - Périodes de floraison des espèces du site de Kervédan (*NR : espèces non renseignées*)

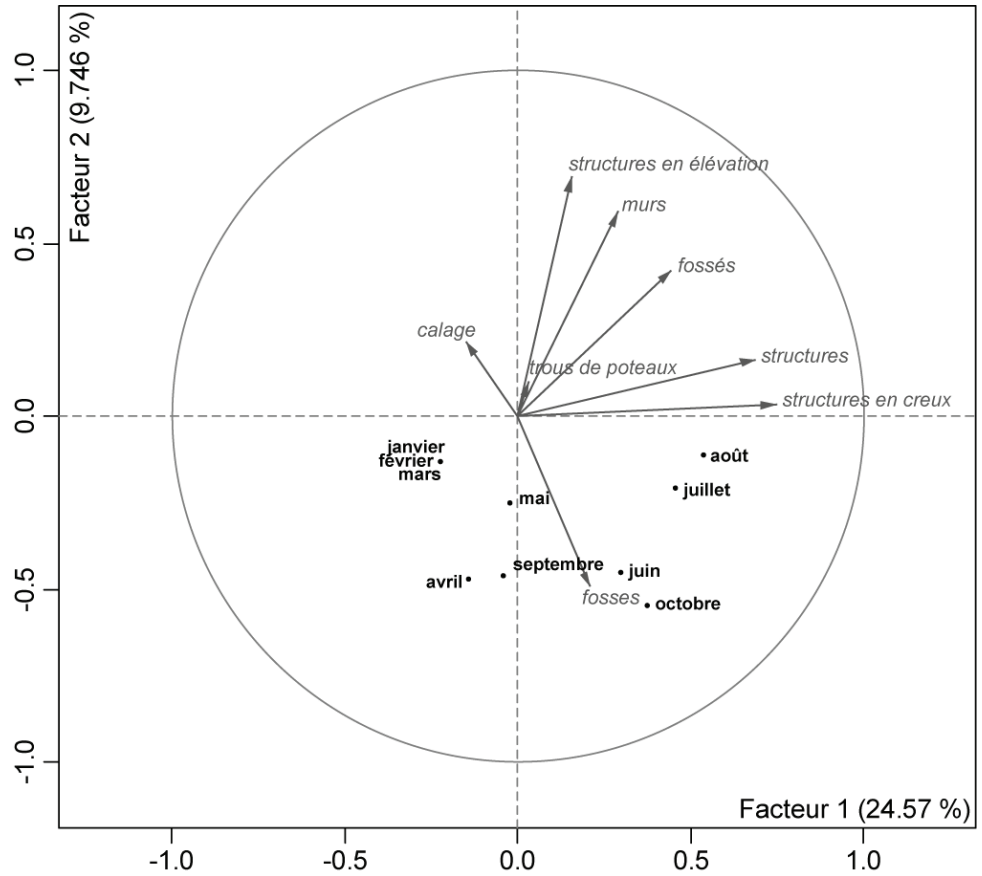


Figure 140 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des périodes de floraison des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures

Il apparaît que l'axe 1 de l'AFM oppose les espèces fleurissant au printemps de celles qui fleurissent en été. En juillet et en août, la floraison est plus importante sur les structures. Au contraire, les taxons fleurissant de janvier à mars sont légèrement plus fréquents hors structures. Toutefois cela ne représente qu'une espèce : le cranson *Cochlearia danica*. De la même manière le mois de juillet n'est caractérisé que par l'absence de floraison de cette dernière et de la canche *Aira caryophyllea* : toutes deux ont une affinité pour les zones sans structures. Les seuls mois vraiment interprétables sont ceux où la proportion d'espèces,

potentiellement en fleurs ou non fleuries, ne représentent pas la majorité des espèces. Seuls trois mois répondent à cette condition, les mois de mai, août et septembre. Pour le mois d'août, il a été vu sa forte liaison avec l'axe 1. Les mois de septembre et mai pour leur part sont liés au deuxième facteur. Il y a une plus forte proportion d'espèces fleuries dans la partie ouest de l'éperon pour ces périodes. A la pleine saison de floraison, il y a donc plus d'espèces à fleurir sur structures. En début et fin de saison, la floraison concerne plus les espèces poussant dans les zones exposées aux embruns.

- ***Résistance aux métaux lourds***

Enfin, les capacités de résistance aux métaux lourds des espèces sont abordées (fig. 141).

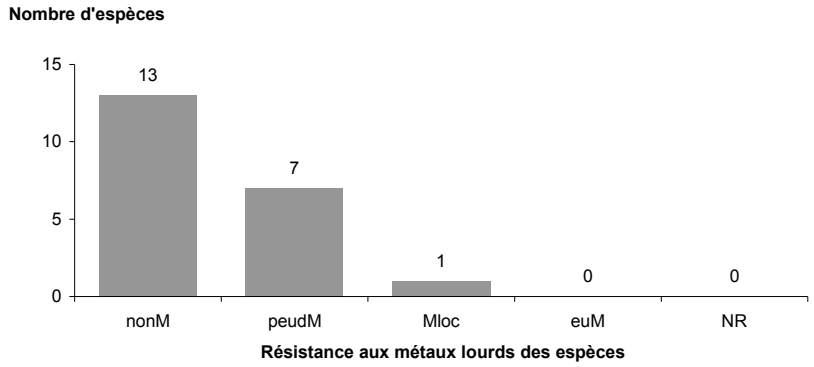


Figure 141 - Capacité de résistance aux métaux lourds des espèces du site de Kervédan (*nonM : non métallophytes ; pseudoM : pseudométallophytes ; Mloc : métallophytes locales ; euM : eumétallophytes ; NR : espèces non renseignées*)

Toutes les espèces sont renseignées dans la base Ecoflora pour ce facteur. La majorité est non métallophyte. Plus d'un tiers tolère cependant la présence de métaux lourds. C'est une proportion non négligeable sachant que dans la base Ecoflora, elles représentent moins de 3% des taxons renseignés. Parmi ces espèces, l'armérie *Armeria maritima* peut être localement métallophyte. C'est sous la sous-espèce *Armeria* maritima ssp. *halleri* qui est connue pour ces propriétés et qui est utilisée en phytoremédiation sur les sites pollués. N'ayant pas affaire à cette dernière, il vaut mieux considérer cette plante comme non métallophyte. Ces précisions faites, il est possible de s'intéresser aux corrélations de ces variables avec le premier plan factoriel de l'AFM (fig. 142).

Il apparaît que les proportions de non métallophytes et de pseudométallophytes sont très corrélées au premier facteur. La proportion de pseudométallophyte est nettement plus élevée sur les structures en creux. Concernant la proportion de métallophytes locales, elle est très liée à l'axe 2. Cette liaison est juste due au fait que l'armérie pousse dans la zone ouest de l'éperon dans les zones les plus exposées aux embruns. Vu que cette espèce est finalement considérée comme non métallophyte, la place de ce type de taxons devrait occuper sur la figure précédente la place opposée des non métallophytes. La corrélation de ces dernières avec les zones sans structures serait ainsi encore plus accrue. Sur les structures en creux il y a ainsi une plus forte proportion d'espèces résistantes aux métaux lourds qu'ailleurs.

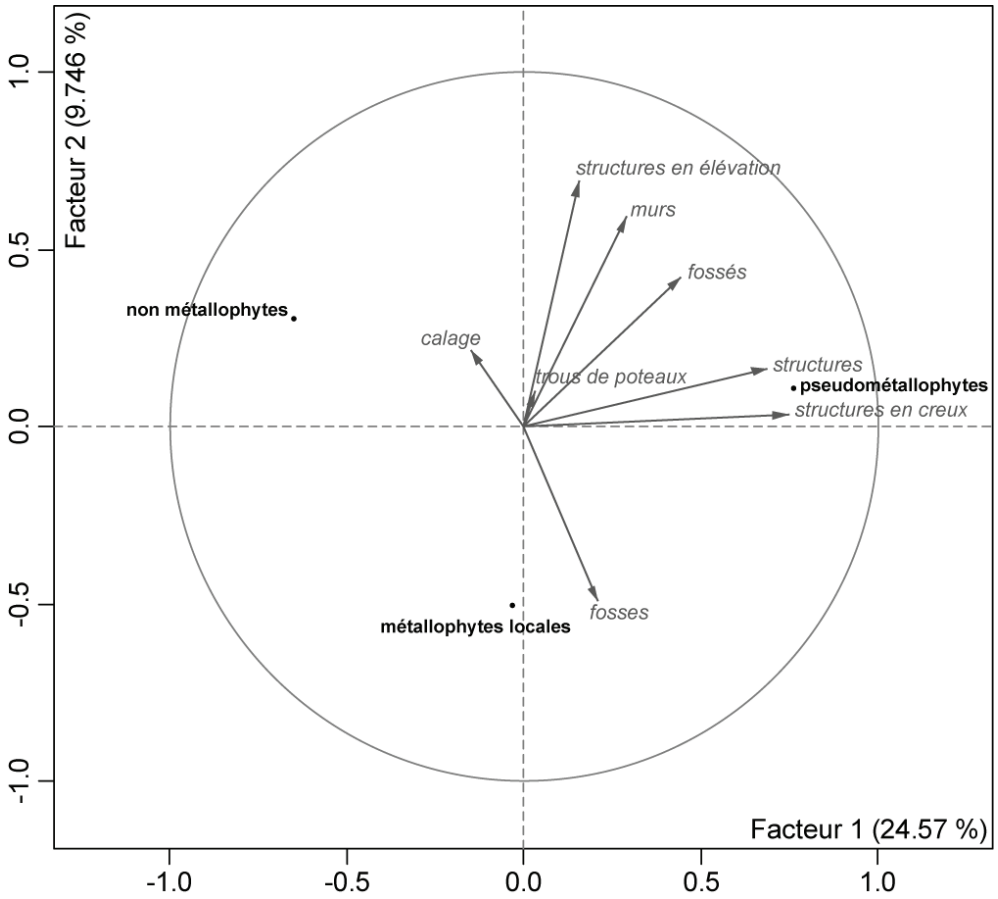


Figure 142 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des comportements face aux métaux lourds des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures

9.2.1.2 Caractérisation du milieu (prédictions)

Comme sur le site du Goënidou, les indices de bioindication ont été utilisés (annexe 22). Les indices moyens ont fait l'objet de représentations cartographiques (annexe 23).

Un des relevés du sondage 3 ne contient que des espèces non renseignées pour les indices de Gégout. Les indices moyens n'ont pu être calculés. Il a fallu interpoler ces données en faisant la moyenne des résultats obtenus dans les relevés adjacents. Une fois cette interpolation réalisée, il a été possible d'intégrer la matrice des prédictions comme groupe supplémentaire de l'AFM (fig. 143).

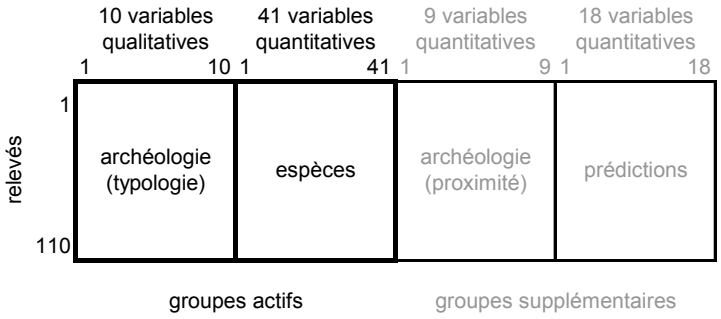


Figure 143 - AFM du Goënidou : structure des données utilisées pour l'analyse de prédiction de la flore

L'AFM peut alors être interprétée sous l'angle de ces indices de bioindication.

- ***Grime***

Les premiers indices utilisés sont les indices de Grime. La nature des données brutes est la suivante (fig. 144).

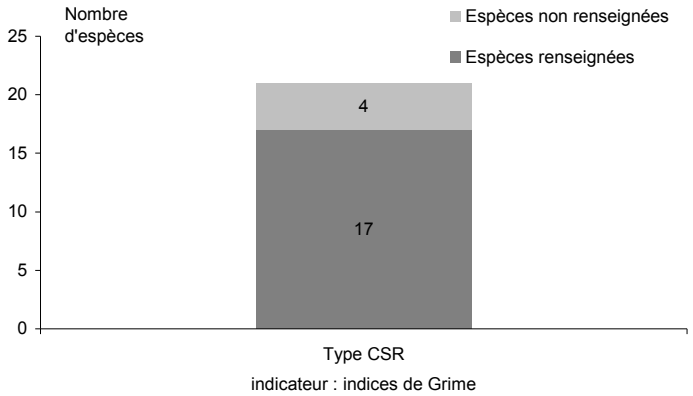


Figure 144 - Part des espèces de Kervédan renseignées pour les indices de Grime

Sur 21 espèces, quatre n'ont pas d'indice de Grime associé : cela ne concerne qu'une faible proportion. Les indices moyens peuvent être considérés comme fiables et insérés dans l'AFM (fig. 145).

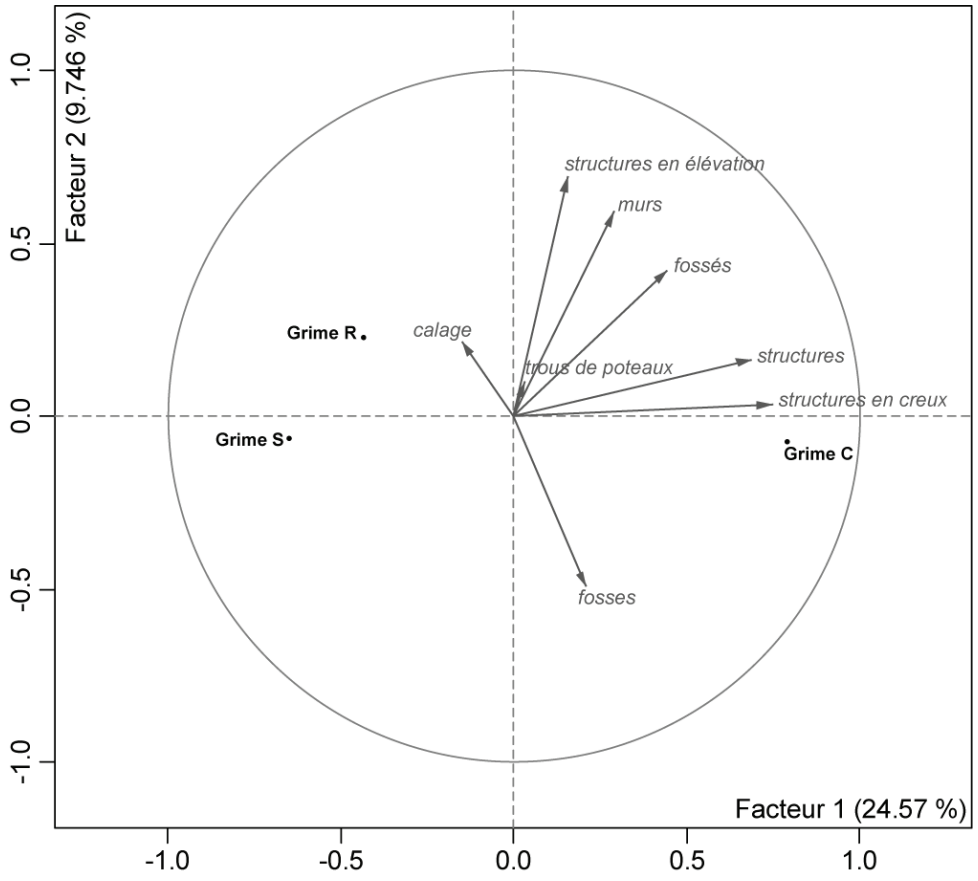


Figure 145 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens de Grime par rapport aux proximités aux différents types de structures

Les trois variables apparaissent bien corrélées avec le premier facteur. La présence de structures en creux se traduit par une augmentation de l'indice **C** et une diminution des indices **S** et **R**. Sur les structures, il y a plus d'espèces compétitives, moins de stress et moins d'espèces rudérales.

L'axe 2 est en revanche peu corrélé avec ces variables. Il est quand même bon de noter que les relevés à l'est de l'éperon ont un indice moyen **R** plus élevé. Les espèces rudérales sont légèrement plus fréquentes dans la partie est de l'éperon.

- ***Ellenberg***

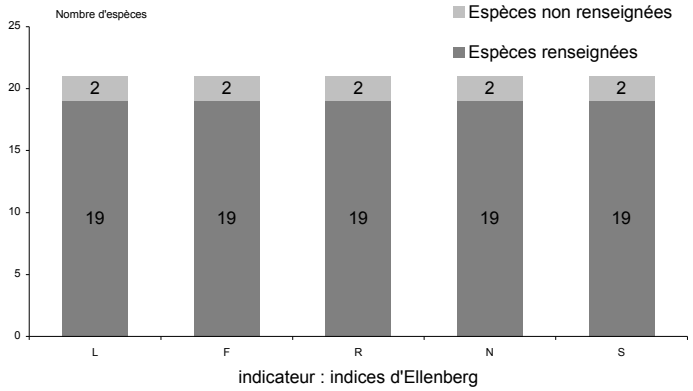


Figure 146 - Part des espèces de Kervédan renseignées pour les indices d'Ellenberg

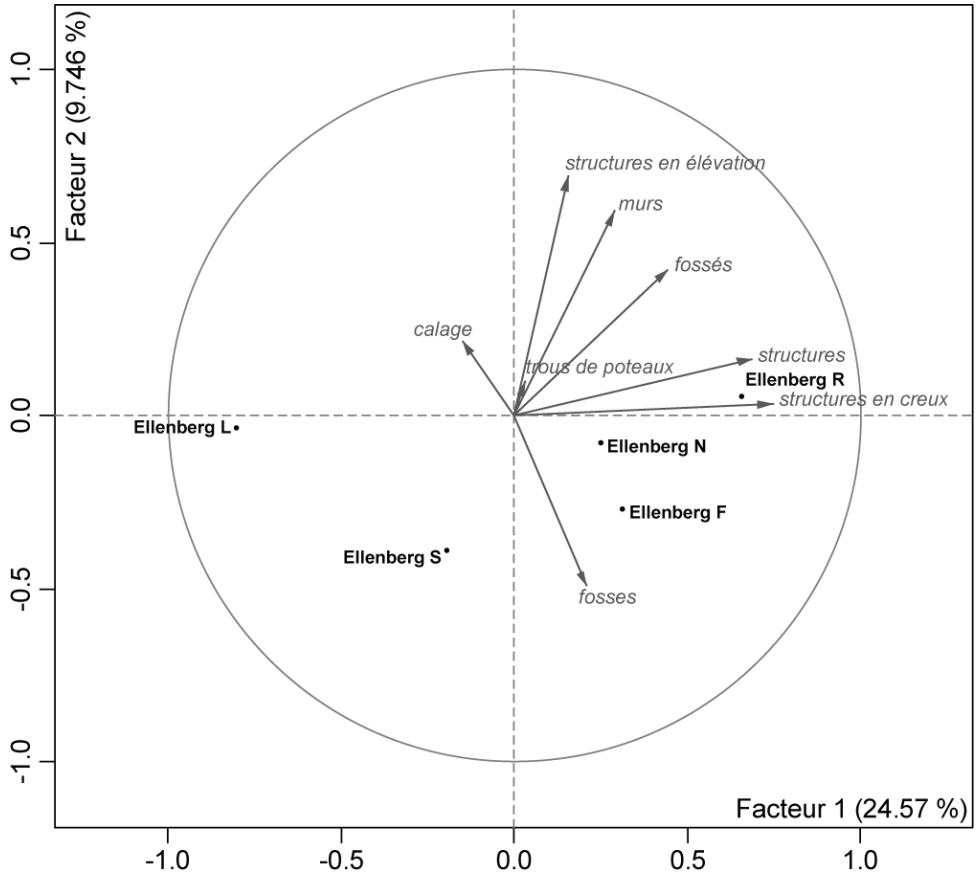


Figure 147 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens d'Ellenberg par rapport aux proximités aux différents types de structures

Les indices d'Ellenberg ont ensuite été utilisés. Deux espèces n'ont pas d'indices attribués (fig. 146).

Etant donné que cela ne représente qu'une faible part du nombre total d'espèces, les indices moyens peuvent être vus comme fiables. La projection de ces indices sur le premier plan de l'AFM montre d'assez bonnes corrélations (fig. 147).

L'axe 1 est très corrélé avec les indices **L** et **R**. Sur les structures en creux, la flore indique un milieu plus fermé et moins acide. Les indices **N** et **F** sont aussi corrélés avec l'axe 1 mais de manière nettement plus faible. Les structures en creux sont caractérisées par une flore de milieux légèrement plus riches et humides.

L'axe 2 est significativement corrélé avec les indices **S** et **F**. La corrélation avec ce dernier indice est assez faible. L'ouest de l'éperon héberge une flore de milieux plus salés et légèrement plus humides par rapport au reste du site.

- ***Gégout***

L'écologie a ensuite été abordée à travers les indices de Gégout. Une proportion non négligeable d'espèces n'a pas de valeurs associées pour ces indices (fig. 148).

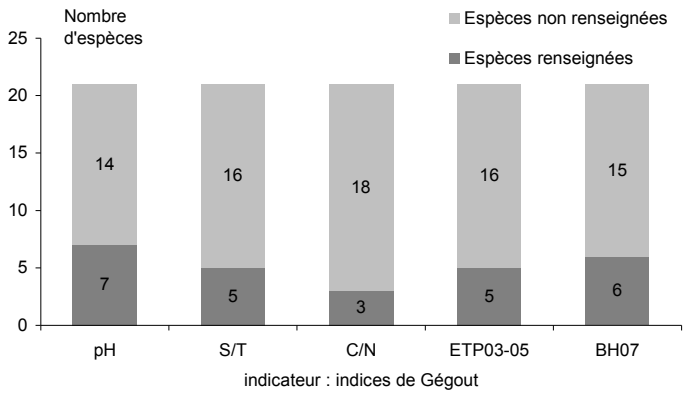


Figure 148 - Part des espèces de Kervédan renseignées pour les indices de Gégout

Dans le meilleur des cas, pour l'indice de **pH**, un tiers des espèces est renseigné. Dans le cas le plus défavorable, pour l'indice **C/N**, seul un neuvième des espèces a un optimum associé. Les indices synthétiques calculés sont donc très peu fiables (fig. 149).

L'axe 1 est fortement corrélé avec les indices **C/N** et **ETP0305**. La végétation des structures en creux semble affectionner les sols ayant un **C/N** plus faible. L'évapotranspiration au printemps y est plus forte. Les indices **S/T** et **BH07** sont légèrement corrélés avec cet axe. Les zones hors structures sont caractérisées par des taxons affectionnant un taux de saturation en bases plus faible et un bilan hydrique de juillet moins déséquilibré.

Les indices **pH** et **BH07** sont liés à l'axe 2. La flore de l'ouest de l'éperon a des affinités pour les sols moins acides et tolère les bilans hydriques de juillet négatif.

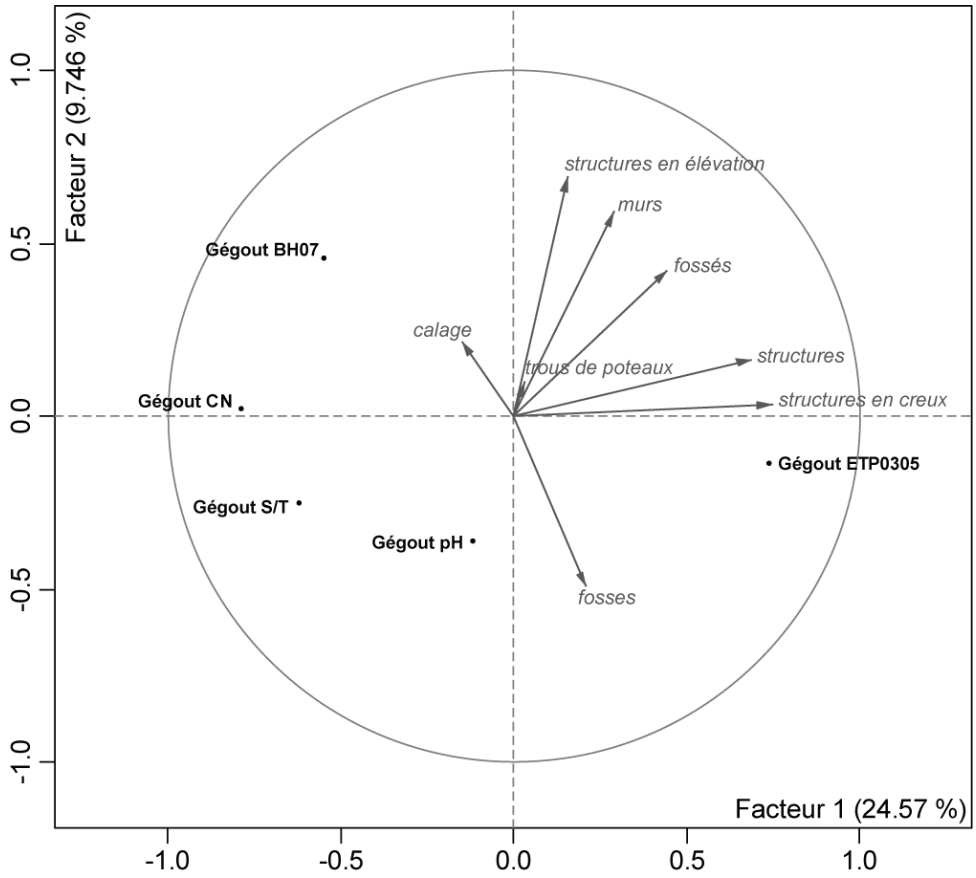


Figure 149 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens de Gégout par rapport aux proximités aux différents types de structures

- ***Hill***

Enfin les indices de Hill sont utilisés pour caractériser des relevés. Trois espèces n'ont pas de valeurs associées dans la base de Hill (fig. 150).

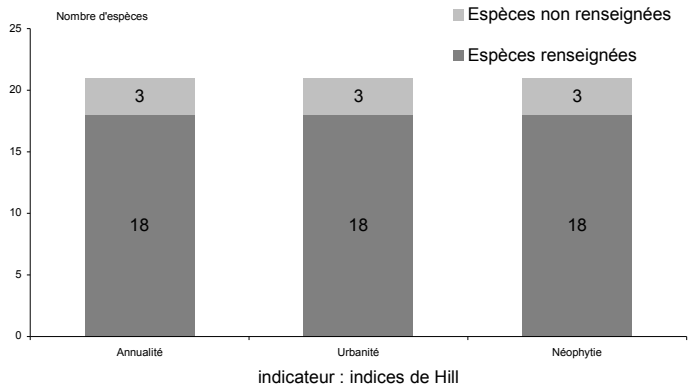


Figure 150 - Part des espèces de Kervédan renseignées pour les indices de Hill

Cela ne correspond qu'à un neuvième des taxons. Le calcul des indices moyens est donc réalisé sur une part importante d'espèces. La représentation de ces indices dans l'AFM est donc fiable (fig. 151).

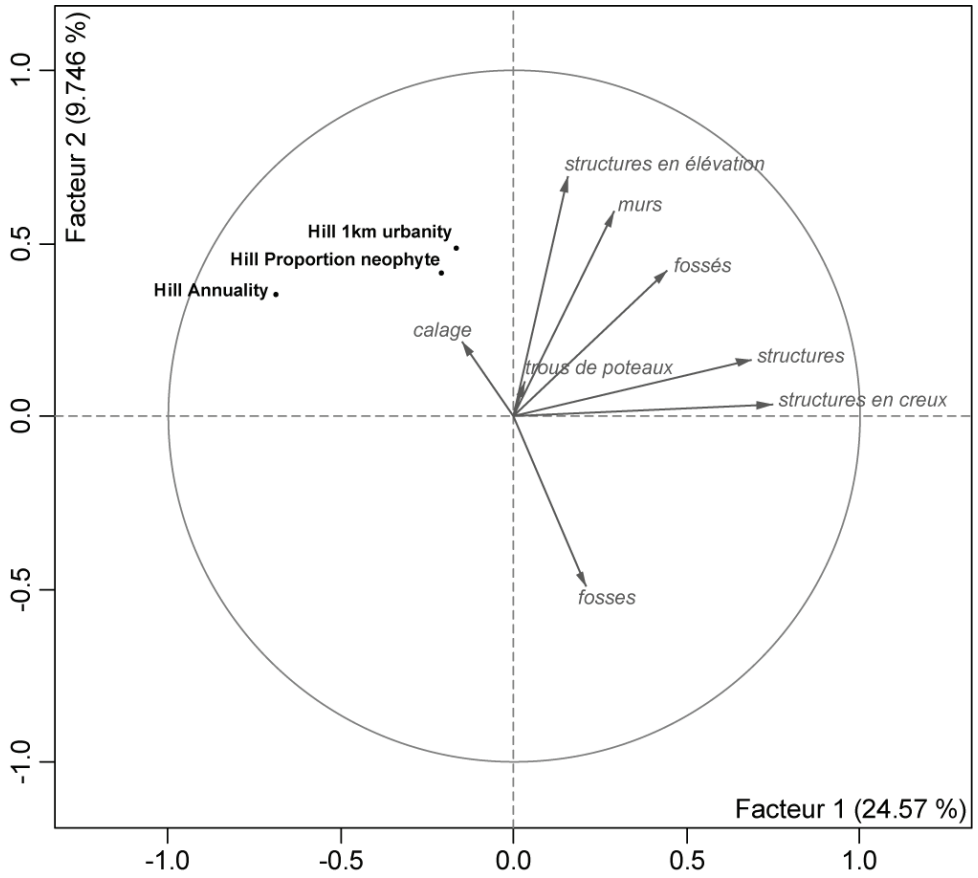


Figure 151 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens de Hill par rapport aux proximités aux différents types de structures

Les trois indices ont une place à peu près équivalente sur le premier plan factoriel. Ils sont tous les trois dans le quart nord-ouest du cercle des corrélations. Les indices **1km urbanity** et **Proportion neophyte** sont très corrélés entre eux. Ils sont liés à l'axe 2. La zone est de l'éperon héberge une flore qui est généralement située dans des milieux légèrement plus urbanisés et contenant une plus grande proportion d'espèces néophytes. L'indice **Annuality** est aussi majoré dans la zone est de l'éperon. Il est toutefois mieux corrélé avec l'axe 1. La flore des zones sans structures est donc habituellement associée à une plus forte proportion d'espèces annuelles.

9.2.2 Discussion

9.2.2.1 Pas d'espèces introduites

L'analyse montre qu'à Kervédan, toutes les espèces présentes sont autochtones (fig. 132). Les espèces non renseignées par la base sont l'armérie *Armeria maritima* et la sagine *Sagina maritima*. Elles sont clairement dans leur milieu et leur introduction est totalement inconcevable. Les autres espèces sont aussi toutes dans un environnement habituel. Il n'y a aucun indice révélant la moindre introduction. Quelques espèces ont bien des propriétés médicinales, mais c'est là chose courante : la majorité des végétaux en ont.

9.2.2.2 Espèces favorisées

- ***Pas d'espèce reflétant une sélection humaine***

Aucune espèce n'a de propriétés particulièrement remarquables et utilisées de manière récurrente. La végétation est basse et intéresse peu l'homme. Il n'y a donc *a priori* pas de plantes directement favorisées.

- ***Pas d'espèces apportées par des animaux liés aux activités humaines***

Il n'y a pas de lien net entre la zoochorie et les structures (fig. 136). Seules deux espèces sont potentiellement dispersées par les animaux. La porcelle *Hypocharis radicata* est indifférente aux structures. La carotte *Daucus carota* pousse préférentiellement sur structures en creux. Ses graines s'accrochent au pelage des mammifères par des aiguillons. La carotte a donc pu être apportée par des animaux sur ces structures. Pour ces deux espèces, ce n'est pas l'unique moyen de dispersion : le vent est aussi un facteur important, ce sont des anémochores. Elles ne sont donc pas clairement zoochores. Aucune différence de flore observée sur l'éperon ne peut être due à des apports de graines par des commensaux de l'homme ou du bétail, il y a plus de 2000 ans.

- ***Les modifications du milieu sur structures participent aux différences de flore***

Il peut en revanche y avoir des taxons avantagés par la modification de l'environnement. Il a été démontré que les propriétés physiques des sols sont différentes sur les structures en creux (Cf. 8.2). Les sols, moins pierreux, sont moins soumis à la sécheresse estivale. Les propriétés chimiques des sols sont indépendantes des structures : elles suivent un gradient est/ouest naturel de salinité. Les indices d'Ellenberg et de Gégout permettent d'étudier la réponse de la végétation à ces modifications (fig. 147 et 149).

L'indice **F** d'Ellenberg est supérieur sur structures mais aussi dans l'ouest de l'éperon. La corrélation avec le premier axe factoriel est moins nette que celle qui avait été observée du point de vue du taux d'humidité. La flore reflète les modifications d'humidité mais intègre aussi sûrement d'autres facteurs.

Parmi les analyses réalisées sur les prélèvements de sol, aucune variable chimique n'est liée aux structures. Toutes sont liées au gradient de salinité est/ouest.

L'indice de salinité **S** d'Ellenberg est plus fort dans la partie ouest de l'éperon, là où les concentrations en sodium sont les plus élevées. La végétation est clairement influencée par le gradient de salinité.

La salinité accrue à l'ouest entraine une diminution d'acidité. L'indice de **pH** de Gégout va dans ce sens. Il est toutefois peu fiable du fait du faible nombre d'espèces intervenant dans le calcul (fig. 148). L'indice **R** d'Ellenberg est nettement accru sur les structures en creux. La flore indique un milieu moins acide. Cela ne représente pas la réalité. L'indice **R** est un bon indicateur pour détecter la présence des structures mais ne représente aucunement les différences d'acidité réelles sur ce site.

Les sols de l'ouest de la pointe sont plus riches, aussi bien en matière organique qu'en

nutriments. L'indice **N** d'Ellenberg indique un léger enrichissement au niveau des structures. Il concorde avec l'indice **C/N** de Gégout qui y est nettement plus faible mais pas avec l'indice **S/T** qui indique au contraire un appauvrissement à ce niveau. Aucun d'eux ne coïncide avec la réalité physico-chimique.

La salinité et l'humidité sont les deux seuls facteurs édaphiques ayant un impact net sur la flore.

Des variables non mesurées peuvent aussi avoir un rôle. Les espèces pseudométallophytes sont clairement localisées sur les structures (fig. 142). Parmi celles caractéristiques de structures, presque toutes sont pseudométallophytes alors qu'aucune de celles fuyant les structures ne l'est. Il peut y avoir eu pollution aux métaux lourds. La fouille fine des structures en creux pourrait renseigner sur une éventuelle activité métallurgique. Les analyses de concentration en métaux pourraient renseigner si la plus forte proportion de métallophytes reflète une telle pollution ou autre chose. Les espèces résistant aux métaux lourds sont, de manière générale, adaptées aux activités humaines.

9.2.2.3 La flore reflète un stade dynamique différent

- ***Observation d'une fermeture du milieu sur les structures***

Sur les structures en creux, l'indice **L** d'Ellenberg est nettement minoré (fig. 147). Les espèces sont plus sciaphiles. L'analyse des types biologiques atteste ce phénomène (fig. 134). Sur structures, les espèces annuelles (thérophytes) laissent place aux herbacées vivaces (hémicryptophytes). Le milieu est plus évolué. Cette diminution des thérophytes induit une baisse du nombre d'espèces à reproduction sexuée exclusive (fig. 138). Les modes de multiplication apparaissent toutefois peu liés aux structures dans l'AFM. L'analyse des cartes le confirme pourtant.

L'indice d'**Annuality** de Hill indique la proportion potentielle d'espèces annuelles. Or, leur proportion est inférieure sur les structures. Il n'est donc pas aberrant que cet indice y soit minoré (fig. 151). Les autres indices de Hill y sont également plus faibles. Ils sont généralement bien corrélés (Hill *et al.*, 2002). Contrairement à ce qui était attendu, ces indices indiquent un milieu plus perturbé par l'homme, plus hémérobe en dehors des structures en creux (Cf. 3.2.3.1.2). Ce phénomène peut être expliqué par la rudéralisation naturelle liée à la sécheresse de ces zones.

- ***Fermeture du milieu sur les structures en creux due à une meilleure ressource en eau***

A l'échelle des structures, cette fermeture ne peut être due à des dates de mise en place de la végétation différentes. La présence d'un taux d'humidité plus élevé peut en revanche expliquer ce phénomène. Même si les indices de Gégout sont calculés sur peu d'espèces, ils appuient ce constat (fig. 148 et 149). La flore indique un bilan hydrique de juillet (**BH07**) plus négatif sur les structures et une évapotranspiration de mars à mai (**ETP0305**) supérieure. La consommation d'eau par les plantes y est plus importante, au printemps comme en été. L'eau

est plus accessible et la production végétale supérieure. Le milieu est moins contraignant : il est moins soumis à la sécheresse estivale. Les indices de Grime corroborent ce fait (fig. 145). Les indices **S** et **R** sont faibles : les perturbations et le stress sont moindres. Les plantes compétitives sont plus nombreuses. Cette compétition ne semble pas induire un partage temporel de niche. La majorité des espèces de structures fleurit à la pleine saison (fig. 140). Les zones sans structures hébergent une plus forte proportion de vernales. Cette caractéristique est sans aucun doute une adaptation des cycles de vie à la sécheresse : ils doivent être terminés avant les mois trop secs.

L'hypothèse de ressource-ratio de D. Tilman (Tilman, 1985) stipule qu'une meilleure disponibilité des ressources en nutriments peut induire un saut dans les successions végétales. Cette hypothèse s'applique ici pour les facteurs hydriques du sol. L'humidité accrue des structures l'été est à l'origine de cette fermeture du milieu localisée. L'ensemble des ressources édaphiques serait ainsi concerné par cette théorie.

- ***Auto-entretien et accentuation des différences de stades dynamiques***

La plupart des espèces sont anémochores : leurs graines sont dispersées par le vent (fig. 135). Ce mode de dispersion est tout à fait adapté dans un milieu aussi exposé. Ces graines sont dispersées à peu près au hasard. Sur structures, les barochores sont plus fréquentes : les graines tombent au sol par simple gravité. Cette absence de dispersion entraîne une absence de déplacement des espèces de structures.

La pointe est abondamment perturbée par le tourisme. Le milieu est piétiné comme l'atteste l'abondance du plantain corne de cerf *Plantago coronopus*. Cela entraîne une érosion du sol. La présence d'une flore vivace sur les structures limite cette dernière. Elle oriente aussi indirectement les promeneurs. Ils marchent de préférence dans les zones de végétation basse ou de sol à nu et amplifient la dégradation différentielle. Ce sol à nu est encore plus sec et inadapté aux espèces de sols frais poussant sur les structures. Seules les espèces annuelles vernales peuvent pousser.

Ces deux phénomènes créent un auto-entretien des différences végétales. Ils accentuent les différences de stades dynamiques. La végétation rase de l'éperon est constamment rajeunie par le piétinement. La flore des structures au contraire est auto-entretenue dans son stade dynamique plus avancé par la barochorie. Les descendants se développent à l'emplacement des pieds-mères.

9.3 Discussion générale

L'analyse écologique des sites du Goënidou et de Kervédan a été effectuée suivant la même démarche. Cette démarche permet d'éprouver la fiabilité des indices de bioindication utilisés. Elle permet surtout de tirer des conclusions sur l'origine des différences de flore observées au niveau des occupations archéologiques par rapport au milieu environnant. Tout cela permet de définir les récurrences écologiques entre sites et de définir quels indicateurs peuvent être utilisés en prospection archéologique.

9.3.1 Fiabilité des indices

Globalement, les indices de bioindication sont fiables. Ils apportent des éléments de réponses logiques. Toutefois des remarques sur leur utilisation sont nécessaires.

- **Fiabilité des indices de description**

Tous les indices de description de la flore n'ont pas la même fiabilité. L'analyse des données sources montre que, globalement, les espèces sont majoritairement renseignées. Toutefois, ce n'est pas homogène.

Les types biologiques, les périodes de floraisons et la résistance aux métaux lourds sont très bien documentés. A Kervédan, toutes les espèces le sont. Au Goënidou, cela représente à chaque fois plus de 95% des espèces.

Il y a un peu moins d'informations concernant les modes de reproduction et le statut des espèces. Il manque des indications pour environ 10% des espèces sur chaque site.

Pour les modes de dispersion, cette proportion peut devenir énorme et atteindre presque la moitié des espèces à Kervédan. Les indices calculés sont peu fiables.

Cette hétérogénéité n'est pas liée aux bases dont sont issues ces indications : la base Ecoflora recense aussi bien les périodes de floraison que les modes de dispersion. Il est important d'avoir à l'idée que chaque caractéristique n'est pas toujours attribuée aux espèces de la base. C'est une base bibliographique. Elle compile les résultats d'études réalisées en écologie. Elles ne sont pas réalisées sur les mêmes caractères ni sur les même espèces.

- **Fiabilité des indices de prédiction**

Pour les indices de prédiction, le calcul intègre, de manière générale, moins d'espèces que pour les indices de description. Les bases concernent moins de taxons. Ce n'est pas gênant au sens où ces indices gagnent en fiabilité en assignant l'abondance comme facteur de pondération. Pour les indices de Grime, d'Ellenberg et de Hill, entre 10% et un quart des espèces ne possèdent pas de renseignements. Les indices d'Ellenberg sont les plus fiables et ceux de Grime les moins renseignés.

Pour les indices de Gégout, le nombre d'espèces rentrant dans le calcul est minime. Leur fiabilité dans les deux études laisse à désirer. Ceci tient à un fait précis : seules les espèces forestières ont été intégrées dans cette base. Au Goënidou, beaucoup d'espèces de landes poussent aussi en forêt. Cela ne pose pas un problème majeur. En revanche ; à Kervédan, sur une pelouse littorale, les espèces communes avec les milieux forestiers sont quasi inexistantes : les indices sont calculés sur une faible part d'espèces. Toutefois, les calculs donnent des résultats cohérents. Ces indices ont l'avantage d'intégrer une double pondération grâce à la prise en compte de l'amplitude écologique. Ces indices ne sont cependant vraiment applicables que pour les milieux forestiers ou semi-fermés.

- **Problème des sous-espèces et écotypes**

L'écologie est toujours confrontée au problème des sous-espèces, des écotypes et des variétés. Au sein d'une même espèce, la réponse à l'environnement n'est pas homogène. Cela

concerne aussi bien certaines caractéristiques que les milieux de vie.

Le cas de l'armérie à Kervédan illustre bien ce problème. Elle est considérée dans la base Ecoflora comme métallophyte locale. Or, cela concerne la sous-espèce *Armeria maritima* ssp. *halleri* utilisée en phytoremédiation. Les bases écologiques s'arrêtent souvent à l'espèce. Les erreurs de détermination font qu'il est souvent difficile d'aborder l'écologie des sous-taxons. L'armérie se retrouve ainsi potentiellement résistante aux métaux lourds en général. Ces limites de détermination peuvent avoir une forte influence sur les indices synthétiques des relevés comme il a été vu pour ce cas particulier.

- **Problème des corrélations entre indices**

Certains indices sont corrélés entre eux.

Par exemple, un milieu fermé est aussi souvent plus riche. L'hypothèse de ressource-ratio de D. Tilman (Tilman, 1985) montre que cet enrichissement est récurrent avec la fermeture du milieu. Les fonds de vallons accumulent l'eau mais aussi les nutriments : il y a un lien fort entre ces variables. Les espèces endoronithochores sont majoritairement des ligneux : ce sont presque les seuls à avoir développé des baies. Pour les indices de Grime, le lien avec les caractéristiques est fort : les indices sont calculés d'après les modes de vie.

Dans le cas des caractéristiques, cela ne pose pas de problèmes. Ce sont des observations. Elles reflètent une réalité biologique.

Dans le cas des indicateurs de milieu, c'est plus délicat. Dans le cas du premier exemple, des espèces caractéristiques des milieux fermés peuvent être qualifiées d'espèces de milieux riches. Elles peuvent être indifférentes à ce facteur : c'est une coïncidence biologique. Les auteurs ayant développé les indices ont essayé d'éliminer au mieux ces biais. Pour H. Ellenberg, dans le cas clair d'une indifférence, l'espèce est caractérisée par une absence de notes. Les cas ne sont pas toujours très clairs. Ce sont des indices synécologiques. Ils sont effectués à partir d'analyses des espèces *in situ*. Gégout a trouvé une parade à ce problème par la modélisation de présence des espèces pour les facteurs du milieu. Cela permet d'avoir à la fois les optimums et l'amplitude de réponse. Cependant, cela reste à ce jour réservé aux espèces forestières.

La bonne discrimination des structures par l'indice d'Ellenberg **R** sur Kervédan peut être due à un tel phénomène de corrélation entre indices de bioindication. Il ne reflète pas une réalité en termes d'acidité mais aide quand-même à discerner l'emplacement des structures en creux.

9.3.2 Réponse par rapport aux modalités envisagées

Entre les deux sites d'étude, les gammes de valeurs prédites sont différentes : les milieux sont très différents que ce soit en termes d'espèces, de fermeture du milieu ou des propriétés du sol. La comparaison des impacts des occupations archéologiques ne peut être réalisée que par la comparaison des interprétations réalisées séparément. Il n'est pas possible de comparer les sites entre eux à partir des valeurs prédites. Les AFM et analyses de cartes permettent, pour chaque site, de voir s'il y a augmentation ou diminution des indices de bioindication sur

les occupations archéologiques. La comparaison des sites se situe au niveau de ces variations relatives et non des valeurs absolues.

9.3.2.1 Absence d'introduction d'espèces

Pour les deux sites étudiés, il n'y a pas d'espèces clairement introduites. Seule la jonquille attire l'attention au Goënidou : elle est en dehors de son milieu habituel. Elle peut potentiellement avoir été plantée à titre ornemental à proximité des bâtiments. Ceci ne reste qu'une hypothèse. Il peut y avoir d'autres raisons expliquant sa présence. Aucune autre espèce n'a pu être introduite. Cette hypothèse d'introduction est peut-être valable pour des sites majeurs comme des châteaux possédant des jardins. Pour les sites plus courants, les introductions ne peuvent, en revanche, pas expliquer les différences de flore, qui pourtant sont marquées.

9.3.2.2 Présence d'une flore favorisée par les modifications du milieu

Sur chacun des sites, il a été démontré que les différences de flore ne peuvent être dues à une sélection humaine des espèces. Le rôle passé du bétail ou des commensaux dans la diffusion de certaines espèces ne peut être envisagé comme pouvant expliquer les différences actuelles de végétation. La distribution actuelle des espèces ne reflète pas une végétation relictuelle.

Les modifications du sol au niveau des activités humaines ont un impact éprouvé sur la flore. Pour les deux sites, le milieu est plus favorable sur les occupations. Au Goënidou, la flore reflète clairement l'enrichissement du sol sur le site, notamment sur les bâtiments. A Kervédan, sur les structures en creux, la végétation singulière est essentiellement due à la présence de sols ayant de meilleures réserves en eau l'été.

Sur les deux sites, la proportion de pseudométallophytes est plus importante sur les structures. Il y a peut-être une pollution aux métaux lourds sur chaque site. Les espèces concernées peuvent aussi tout simplement être adaptées aux perturbations humaines en général. Seule l'analyse chimique des concentrations de ces éléments dans les sols pourrait le prouver.

9.3.2.3 Fermeture du milieu au dessus des occupations archéologiques

Pour chaque analyse, il est clairement apparu que, sur les occupations archéologiques, la flore est caractéristique de milieux plus ombragés. Cette fermeture du milieu est sans aucun doute liée à l'enrichissement du sol, que ce soit en nutriments ou en eau. Suivant l'hypothèse du ressource-ratio de D. Tilman, le milieu plus favorable a permis à une végétation plus évoluée de s'installer (Tilman, 1985). Ces différences de stades dynamiques sont auto-entretenues grâce aux modes de dispersion des espèces. Au Goënidou, la présence d'arbustes sur les structures permet aux oiseaux de se percher et d'amener des graines d'autres ligneux. Pour Kervédan, l'absence de dispersion à distance des graines sur les structures favorise le maintien des espèces présentes.

Cette fermeture du milieu sur les structures avait déjà été observée au cours de mon DEA sur la forêt de Haye. Là aussi, la flore y indiquait un milieu *a priori* plus riche. L'absence d'analyse de sols n'avait pu confirmer cette modification durable des sols. L'observation du même phénomène sur les sites du Goënidou et de Kervédan permet de valider ces résultats, obtenus à une autre échelle : celle du paysage. Cette convergence permet d'envisager d'autant plus l'application de la bioindication comme outil de prospection archéologique.

9.3.3 Indices utilisables en prospection botanique

L'enrichissement du sol et la fermeture du milieu, caractéristiques des structures, peuvent être abordés par différents indices. Ils peuvent être utilisés pour détecter les occupations anciennes.

L'indice moyen **L** d'Ellenberg est naturellement indiqué. Pour les deux sites, il montre clairement la fermeture de milieu sur les occupations. L'analyse des types biologiques apporte des renseignements complémentaires. Elle permet de confirmer l'indice précédent.

Les stades dynamiques avancés sont caractérisés par une plus forte productivité végétale. Les indices synthétiques **ETP0307** et **BH07** de Gégout apportent des informations sur cette productivité. De la même manière, l'indice **C/N** diminue sur structures et indique une meilleure dynamique des humus liée à cette hausse de productivité. Ces indices sont toutefois déconseillés pour l'étude des milieux ouverts.

L'enrichissement du milieu pose plus de problèmes sur le choix des indices. Il n'y a pas un enrichissement caractéristique : il peut y avoir plus de nutriments ou d'eau. Il apparaît toutefois que l'indice **N** d'Ellenberg est majoré au niveau des deux occupations. Il reflète globalement l'enrichissement et peut être utilisé avec précausion. Les indices de Grime peuvent se révéler utiles : le milieu plus riche entraîne une diminution du stress **S**, qu'il soit hydrique ou minéral. Cette réponse est accompagnée d'une hausse de la compétitivité **C**.

Enfin, comme il a été perçu précédemment, la proportion d'espèces résistantes aux métaux lourds est un bon indicateur des perturbations archéologiques, même s'il ne reflète pas nécessairement une réalité physico-chimique.

Tous ces indices sont à utiliser avec précaution, ils ne donnent que des indications, des aides au raisonnement. D'autres phénomènes que les structures archéologiques peuvent induire des réponses de la flore similaires. Ils ne peuvent être utilisés que de manière relative au sein d'une formation végétale : d'un milieu à l'autre, leurs gammes de valeurs changent.

Conclusion

L'analyse de l'écologie des espèces du Goënidou et de Kervédan permet de répondre aux questionnements sur l'origine des différences de flore observées sur ces occupations archéologiques. La modification des sols en est sans aucun doute la cause. La meilleure disponibilité des ressources en nutriments, sur les bâtiments, ou en eau, sur les structures en creux, favorise la présence de nouvelles espèces. Pour les deux sites, cet enrichissement entraîne une fermeture plus précoce du milieu suivant l'hypothèse de ressource-ratio de D. Tilman (Tilman, 1985). Il induit un saut dans les successions végétales. Sur ces deux sites,

la distribution actuelle des végétaux n'est pas due à l'introduction d'espèces ou à leur favorisation par l'homme à l'époque de l'occupation des sites. Au Goënidou, la jonquille éveille toutefois l'attention : elle est en dehors de son milieu habituel et peut avoir été plantée. Elle aurait perduré depuis.

Il y a récurrence écologique entre les sites quant à la disponibilité des ressources et la fermeture du milieu. Cela permet d'envisager d'utiliser la bioindication comme outil de prospection botanique. Les indices reflétant l'enrichissement et la fermeture du milieu sont naturellement les plus à même d'être utilisables. La proportion d'espèces résistant aux métaux lourds semble aussi un bon indicateur. Il se peut que les sites étudiés soient l'objet de pollutions par de tels éléments.

Chapitre 10 Perspectives : un nouvel outil de bioindication au service de la prospection et de l'interprétation archéologique

Comme il a été démontré précédemment, la bioindication s'avère utile dans la détection des structures ou des aires d'activité. Elle permet de s'affranchir des espèces et d'appréhender tous les milieux naturels de façon similaire. Des sites sans espèces communes peuvent être comparés. Des différences similaires entre plusieurs sites peuvent être révélées, même avec un cortège d'espèces totalement différent. Toutefois la bioindication nécessite de connaître l'écologie de chaque espèce et est donc difficilement utilisable sur le terrain. Actuellement, la bioindication de terrain est une discipline de spécialiste puisqu'elle nécessite une bonne connaissance de la flore : elle est souvent pratiquée de manière empirique. L'écologue, de par ses connaissances sur l'écologie des espèces présentes, peut ressentir des différences : il arrivera par exemple à définir si une station est plus acide qu'une autre. Il est toutefois actuellement difficile sur le terrain de définir ces différences de manière certaine par des mesures. En laboratoire, il est, en revanche, possible de créer rapidement des indices de bioindication fiables. La base de données réalisée dans le cadre de cette thèse en est un très bon exemple. Une base de données comme celle développée dans le cadre de cette thèse peut, embarquée sur un ordinateur portable, devenir un outil rapide et efficace de bioindication sur le terrain. Un formulaire dynamique, où les indices de bioindication apparaissent directement lors de la saisie des relevés, a été développé dans cet objectif.

10.1 Présentation du formulaire de bioindication de terrain

Le formulaire est intégré dans la base de données Access développée dans cette étude. Les requêtes utilisées sont celles décrites précédemment. L'avantage de cet outil est que ces requêtes sont automatisées. La saisie est réalisée sur le formulaire et les résultats des requêtes s'affichent directement. La base de données s'ouvre tout d'abord sur une page d'accueil et d'explications (fig. 152).

Celle-ci permet de renseigner l'utilisateur sur le fonctionnement du formulaire[114]. L'accès aux références bibliographiques des données sources utilisées dans cette base est aussi possible. Un lien hypertexte renvoie vers les bases de données lorsqu'elles sont accessibles à partir d'internet (fig. 153).

La même démarche est possible pour accéder à la base nomenclaturale INPN utilisée. Les méthodes de calcul sont aussi expliquées sur un formulaire indépendant[115]. La façon de citer cet outil pour les utilisateurs voulant l'utiliser dans des publications est aussi décrite[116].

[114] Sous la forme d'un lien vers un .pdf de ce chapitre.

[115] Ce formulaire est un condensé du chapitre 6.1.4.4.

[116] La référence bibliographique de la thèse est insérée dans cette partie.

Enfin, un bouton permet d'afficher directement le formulaire principal de bioindication lui-même. Celui-ci est découpé en deux grandes zones : une zone de saisie et une zone de résultats.

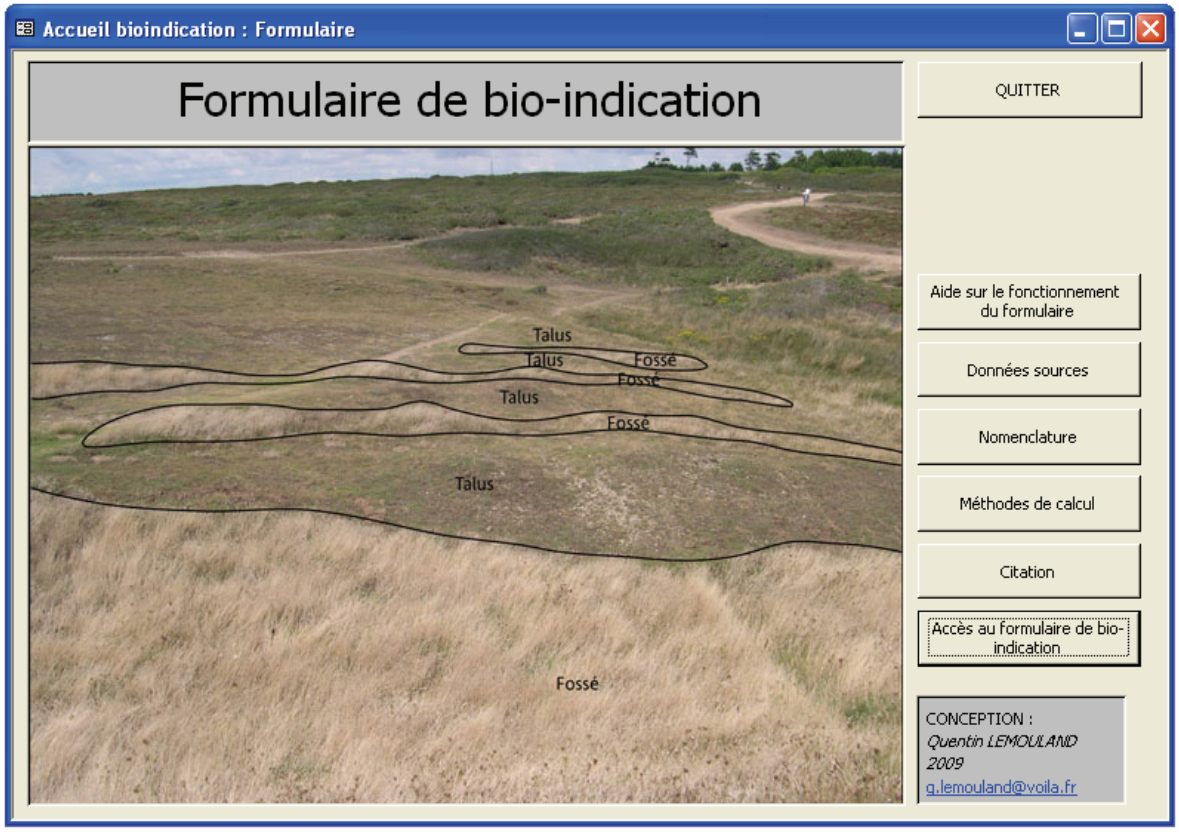


Figure 152 - Page d'accueil de la base de données de bioindication

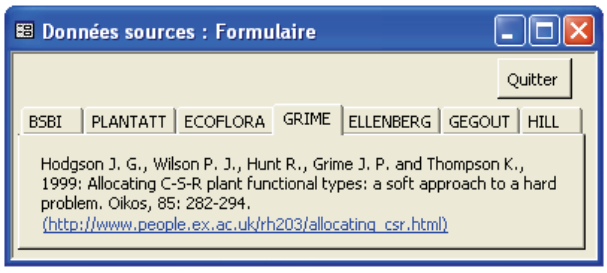


Figure 153 - Références des données sources de la base de données de bioindication (exemple de Grime)

10.1.1 Zone de saisie

La zone de saisie est, elle-même, divisée en deux parties : une zone de saisie des caractéristiques générales du relevé et une zone de saisie des relevés botaniques proprement dits (fig. 154).

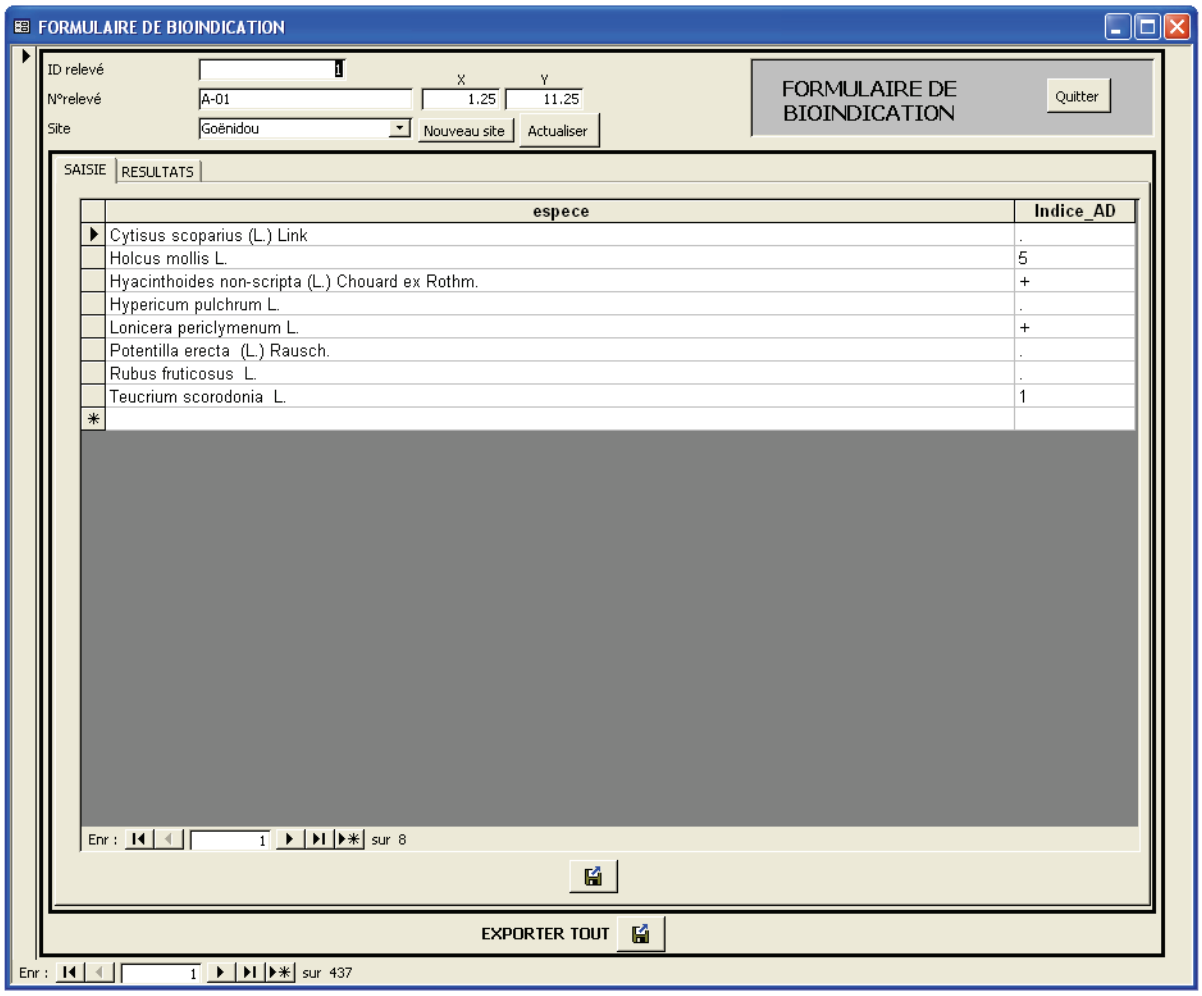


Figure 154 - Formulaire principal de bioindication : zone de saisie (exemple du premier relevé du Goënidou)

10.1.1.1 Saisie des caractéristiques générales du relevé

Au niveau des caractéristiques générales, un numéro de relevé est attribué d'office par la base à chaque nouveau relevé : *ID relevé*. Ce numéro n'est pas modifiable. Il est juste mentionné à titre indicatif. L'auteur du relevé peut avoir son propre système de numérotation et ne pas suivre cette numérotation d'office. Dans ce cas, il peut saisir le nom de chaque relevé dans la case *N°relevé*. Pour chacun, l'utilisateur a la possibilité de saisir ses coordonnées spatiales *X* et *Y*. Celles-ci peuvent être des coordonnées relatives au sein d'un site ou des coordonnées absolues tirées d'un GPS ou d'un repérage sur carte. C'est à l'utilisateur de définir son système de coordonnées géographiques. Il peut bien sûr ne pas saisir de coordonnées. Toutefois, cette saisie est particulièrement utile lors de l'utilisation conjointe de cette base avec un SIG. Si l'utilisateur n'est pas obligé d'entrer des coordonnées géographiques, il doit en revanche saisir nécessairement le nom du site dans la case *site*. Cette saisie s'effectue à l'aide d'un menu déroulant. Dans le cas d'un nouveau site, il est indispensable d'ouvrir avant le formulaire site en cliquant sur le bouton pression *Nouveau site* (fig. 155).

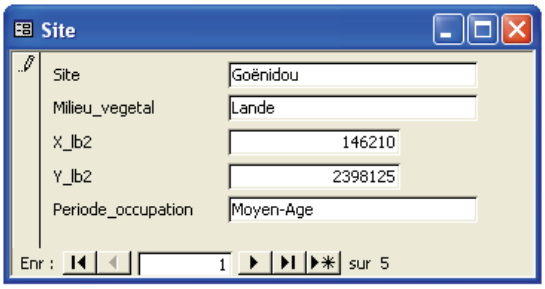


Figure 155 - Sous-formulaire de saisie des caractéristiques des sites d'étude (exemple du Goënidou)

Dans ce formulaire site, l'utilisateur entre le nom du nouveau site. Il peut, de manière optionnelle, entrer aussi ses coordonnées spatiales, de préférence en Lambert II étendu. Le type de milieu végétal et la période d'occupation, dans le cas de l'étude d'un site archéologique connu, peuvent aussi être saisis. Il suffit de fermer ce formulaire pour revenir au formulaire principal.

10.1.1.2 Saisie des relevés botaniques

Une fois ces données générales indiquées sur le relevé, l'utilisateur peut ensuite saisir les données de végétation dans un sous-formulaire intégré dans le formulaire principal. L'utilisateur entre le nom de chaque espèce relevée (*espece*) et son indice d'abondance/dominance associé (*Indice_AD*) à l'aide de menus déroulants. Les espèces et abondances citées doivent systématiquement se trouver dans ces listes. Pour les abondances, la manipulation est aisée : il suffit de suivre les recommandations de J. Braun-Blanquet. Pour ce qui est des espèces, cela est plus délicat. La nomenclature utilisée est celle du Muséum National d'Histoire Naturelle via la base INPN ; il faut donc utiliser les noms valides des espèces. Pour des relevés en France, l'utilisateur ne devrait rencontrer aucun problème à cette étape. Cependant, la flore n'est pas figée et une nouvelle espèce invasive peut, par exemple, apparaître dans les relevés. Cette base n'accepte pas la saisie d'espèces autres que celle de la liste déjà très exhaustive. Dans ce cas, il sera malheureusement impossible de saisir l'espèce en question. Toutefois cela ne devrait se rencontrer que de manière extrêmement rare. Pour la saisie des espèces, la liste est très longue. Il est parfois fastidieux de trouver l'espèce identifiée dans la liste. Pour faciliter la saisie, il suffit de taper les premières lettres de l'espèce pour réduire considérablement les choix. Lors de la saisie de l'observation d'une espèce, une nouvelle ligne s'ajoute dans le sous-formulaire. Celle-ci permet de saisir l'observation suivante. La démarche est répétée jusqu'à ce que toutes les espèces du relevé aient été répertoriées et leurs abondances respectives estimées. Un bouton d'enregistrement situé en bas du sous-formulaire permet d'exporter les données de l'ensemble des relevés au format Excel (.xls).

10.1.2 Zone de résultats

La zone de résultats est stockée dans un deuxième onglet du sous-formulaire de saisie (fig. 156).

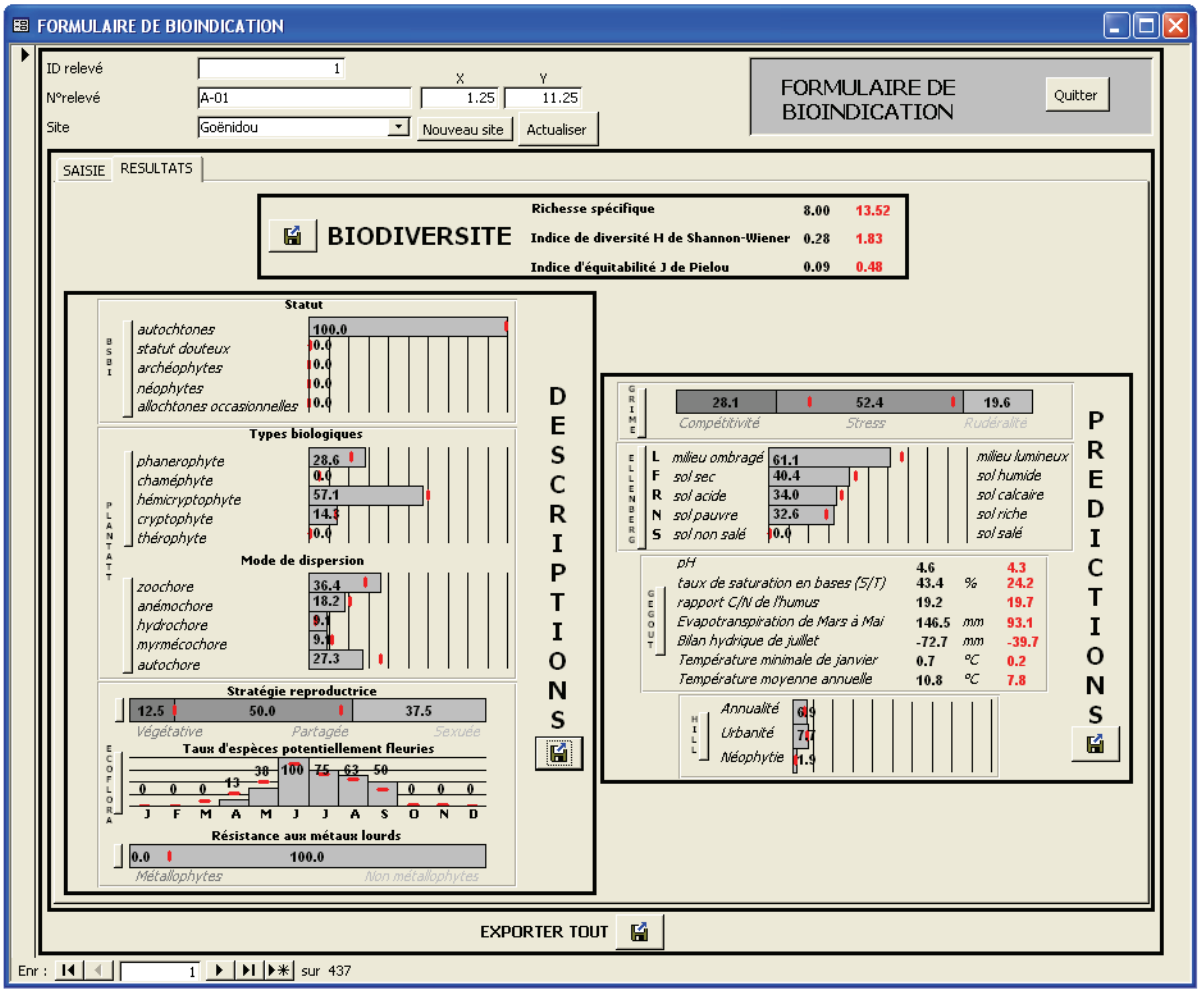


Figure 156 - Formulaire principal de bioindication : zone de résultats (exemple du premier relevé du Goënidou)

Cette séparation permet de ne pas avoir une zone de formulaire trop grande et par conséquent de l'adapter à la majorité des résolutions d'écrans. Ces résultats sont affichés sous forme de graphiques dynamiques. Ils sont réactualisés au fur et à mesure de la saisie et représentent le résultat des requêtes de la base de données. Ils sont dépendants du relevé affiché mais aussi de l'ensemble des relevés saisis. Ces graphiques sont répartis en trois catégories.

10.1.2.1 Indices de Biodiversité

La première catégorie est celle des indices de biodiversité. Ces indicateurs ne prennent pas en compte l'écologie des espèces. Ils n'intègrent que les données saisies : les espèces et leurs indices d'abondance/dominance. Pour chaque relevé, la richesse spécifique, l'indice de diversité de Shannon-Wiener et l'indice d'équitabilité de Pielou sont calculés et affichés (en noir). Pour comparaison, les indices moyens calculés sur l'ensemble des relevés du site sont affichés (en rouge).

10.1.2.2 Indices de Description

La deuxième catégorie est celle des indices de description. Ces indices servent à décrire la

flore et n'intègrent que les espèces et leurs caractéristiques écologiques. Les abondances/dominances ne sont pas prises en compte. Les graphiques renvoient le pourcentage d'espèces du relevé répondant à une caractéristique écologique particulière. Ces pourcentages sont présentés sous forme de diagramme en bâton, comme des curseurs, afin d'avoir une meilleure vision. Plus le bâton est long, plus le pourcentage d'espèce concerné est important. La valeur de ce pourcentage est affichée pour information. A titre de comparaison, les indices moyens calculés sur l'ensemble des relevés du site sont affichés sous forme d'une barre rouge. Ceci permet de visualiser clairement pour un relevé les caractéristiques écologiques différentes des autres relevés. Les caractéristiques affichées dans ce formulaire sont issues de trois bases de données.

La première base utilisée est celle du « BSBI » (*Botanical Society of the British Isles*). Elle sert pour la caractérisation du statut des espèces. Il est ainsi possible d'observer si certaines espèces ont pu être introduites, et à partir de quelle période.

La deuxième base utilisée est la base « Plantatt » (*Plant attributes*). Elle sert à renseigner les types biologiques des espèces et leurs modes de dispersion. Les types biologiques donnent une idée de la physionomie de la végétation. Ils permettent donc de voir d'éventuelles différences au niveau des stades de successions végétales. Ils offrent aussi la possibilité de se faire une idée des stratégies biologiques des espèces, et donc de la compétition interspécifique. Les modes de dispersion renseignent sur les modes de transport de graines de ces espèces. Ils permettent de détecter par exemple un relevé dont la majorité des espèces a sûrement été implantée par des animaux. Cela permet d'apporter des éléments de réponse quant à l'éventuel rôle de commensaux de l'homme dans l'arrivé de ces espèces sur un site.

La troisième est la base « Ecoflora » (*Ecological Flora of The British Isles*). Elle sert notamment à appréhender les stratégies reproductrices des espèces, leurs périodes de floraison et leurs capacités de résistance aux métaux lourds. Les stratégies reproductrices et les périodes de floraisons amènent des réponses quant aux phénomènes de compétition interspécifique. Les capacités de résistance aux métaux lourds peuvent révéler la présence éventuelle d'un site ayant été pollué par de tels éléments comme par exemple un site d'artisanat.

10.1.2.3 Indices de Prédiction

La troisième catégorie d'indice concerne les indices de prédiction. Ils sont plus fins que les indices de description. Ils prennent en compte l'abondance/dominance des espèces : plus une espèce est abondante, plus elle a de chance d'être dans son milieu de prédilection. Une telle espèce doit donc influer de manière plus forte le calcul de prédiction des caractéristiques du milieu qu'une espèce faiblement représentée. Les indices présentés dans cette base sont issus de quatre bases différentes : celles de Grime, d'Ellenberg, de Hill et de Gégout. Les trois premières ont été adaptées en pourcentages. Ceci permet d'avoir une représentation en bâton comme pour les indices de diversité et facilite la lecture. Les indices moyens sur l'ensemble du site ont, de la même manière, été représentés par des barres rouges à titre de comparaison. Pour la base « Gégout », cette transformation en pourcentage n'a pas été possible. Les résultats sont donc affichés simplement par leurs valeurs comme pour les indices de diversité.

La comparaison avec les indices moyens sur le site est moins visuelle et nécessite une confrontation des valeurs.

La base « Grime » sert à estimer les stratégies des plantes du relevé. L'énergie allouée est répartie suivant les trois stratégies **C**, **S** et **R**. La base « Ellenberg » renseigne sur les caractéristiques du milieu d'un point de vue luminosité du relevé (**L**) mais aussi au niveau de l'humidité (**F**), de l'acidité (**R**), de la richesse (**N**) et de la salinité du sol (**S**). La base « Gégout » permet de prédire certaines valeurs quantitatives du milieu. Ces valeurs sont le **pH**, le taux de saturation en bases (**S/T**) le rapport carbone/azote de l'humus (**C/N**), l'évapotranspiration de mars à mai (**ETP0305**), le bilan hydrique de juillet (**BH07**), la température minimale de janvier (**Tmin01**) et la température moyenne annuelle (**TmoyA**) (les deux indices sont ajoutés dans la base par rapport à l'étude faite dans le reste de la thèse). La base « Hill », quant à elle, renseigne sur l'anthropisation du milieu. Cette anthropisation est abordée par des indices assez corrélés entre eux : les indices d'annualité (proportion potentielle d'espèces annuelles : **Annuality**), d'urbanité (probabilité d'être dans un milieu urbain : **1km urbanity**) et de néophytie (proportion potentielle d'espèces néophytes : **Proportion neophyte**).

10.2 Limites d'utilisation

Comme tout outil, il connait des limites d'utilisation qu'il est important de préciser afin d'éviter les interprétations abusives pouvant survenir du fait d'une méconnaissance du fonctionnement de cette base. Le formulaire principal, de par sa structure, est conçu pour avoir un certain recul sur les données. Il est possible pour chaque relevé de vérifier les données sources utilisées pour le calcul de chaque indicateur. Il n'y a pas de « boîte noire ». Ceci permet d'écarter la majorité des risques d'interprétations abusives.

• Nombre d'espèces du relevé

La première limitation de l'outil vient du nombre d'espèces saisies. Plus celui-ci est important, plus les valeurs prédites seront fiables. Il est naturellement contre indiqué de se fier à des valeurs de prédiction basées sur un nombre d'espèces trop faible. Le nombre d'espèces relevées est lié à la surface échantillonnée. Vouloir augmenter le nombre d'espèces en augmentant cette surface n'est pas une solution puisque augmenter la surface revient à perdre en résolution. Plus un relevé est grand, plus il a de risques d'être hétérogène. Cela aboutit souvent à l'échantillonnage de plusieurs milieux dans le même relevé. Utiliser cet outil sur plusieurs milieux intégrés dans un même relevé n'a aucun sens et obtenir des indicateurs moyens de milieux différents ne présente aucun intérêt. Il est préférable de regarder la richesse spécifique du relevé concerné pour se donner une idée de la fiabilité des indicateurs de ce dernier. Il est possible de comparer cette valeur à la richesse spécifique moyenne observée sur l'ensemble des relevés du site. Un écart trop grand permet d'alerter quant à la significativité des indicateurs de ce relevé par rapport aux autres du même site.

- **Nombre d'espèces intégrées dans les calculs**

Pour les indicateurs autres que les indicateurs de biodiversité, toutes les espèces ne sont pas intégrées dans les calculs. Les indicateurs de biodiversité ne s'appuient que sur les données saisies. Il n'y a donc aucun facteur extérieur dans les calculs, et la fiabilité de ces indices est directement évaluable grâce à la richesse spécifique. En revanche, les autres indices font appel à des tables extérieures intégrées dans la base de données. Or ces bases ne sont pas exhaustives. Certains taxons sont absents ou ne sont pas renseignées sur certains indices. Le nombre d'espèces pris en compte dans chaque calcul est donc souvent inférieur au nombre d'espèces du relevé. Pour estimer la fiabilité de chaque indice, il est nécessaire de connaître le nombre d'espèces intervenant dans le calcul. Pour ce faire, des boutons de commande d'ouverture de sous-formulaire ont été installés à gauche de chaque indice. Dans ces sous-formulaires, les valeurs de chaque espèce du relevé pour l'indicateur concerné sont consignés (fig. 157).

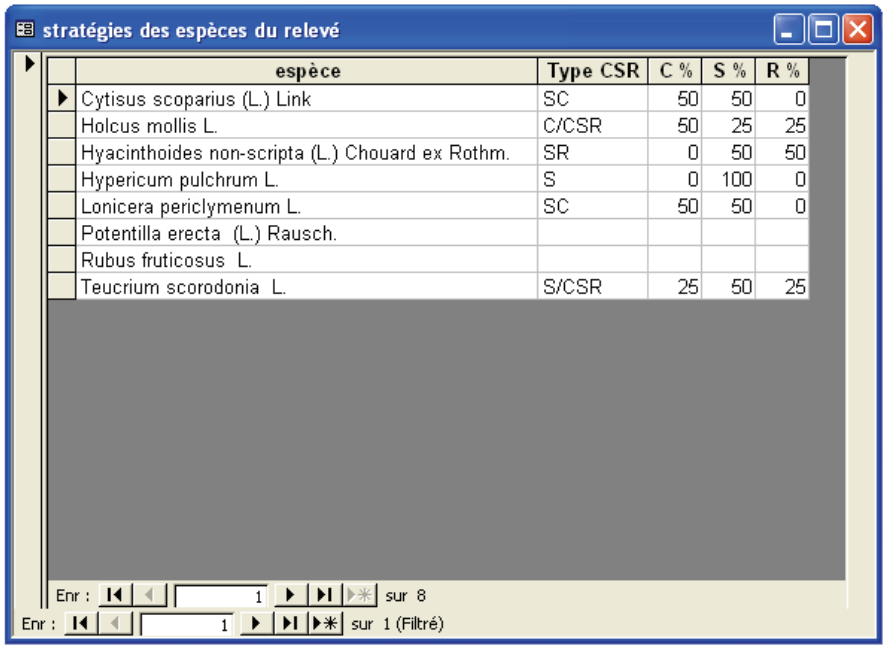


Figure 157 - Visualisation des données sources associées au relevé étudié (exemple de Grime)

Les absences d'entrée dans les bases sources sont ainsi directement visibles. Un simple aperçu permet de connaître le nombre d'espèces non prises en compte dans le calcul. Il permet aussi de voir spécifiquement comment les autres espèces interviennent dans ce calcul.

- **Erreurs de détermination**

Les différents individus d'une espèce ne sont pas tous semblables. Certaines espèces ont une morphologie très proche. Le nombre d'espèces existant par ailleurs est très élevé. Un botaniste ne peut connaître toutes les espèces. Il doit souvent s'aider de flores pour l'identification. Pour ces différentes raisons, il arrive parfois qu'il y ait des erreurs de détermination. Des espèces très proches peuvent avoir une écologie totalement différente. Ces erreurs de détermination peuvent conduire à des erreurs de calcul des indices non

négligeables. Plus le nombre d'espèces du relevé est faible, plus ces erreurs ont un impact fort sur le résultat final. Pour déceler d'éventuelles erreurs de détermination, il est nécessaire de regarder en détail les valeurs accordées aux espèces pour chaque indice dans chacun des sous-formulaires. Une valeur d'une espèce extrêmement éloignée des valeurs des autres espèces pour un indice doit éveiller l'attention car il y a peut-être eu, dans ce cas, erreur de détermination.

- **Variabilité latérale de faciès *versus* valeur seuil**

D'un milieu à l'autre, les valeurs prédites changent. Il est dans ces conditions difficile de définir si un relevé est anormal pour un indicateur en particulier. On ne peut pas fixer de valeurs seuils pour chaque indicateur. Un relevé ne peut être considéré anormal pour un facteur que par rapport à l'ensemble des autres relevés d'un même milieu ou d'un même site. Pour identifier ces relevés, les valeurs moyennes de chaque indice sur le site concerné ont été représentées en rouge. Ceci permet de comparer facilement les relevés d'un même site, et ce pour chaque indicateur. Un simple coup d'œil sur les graphiques permet de repérer très vite le particularisme d'un relevé.

- **Risque d'origine autre qu'archéologique**

Ces relevés particuliers, anormaux par rapport aux autres relevés du site, peuvent refléter la présence enfouie de structures archéologiques. Toutefois, les anomalies peuvent être d'une nature différente. D'autres facteurs, autres que les structures archéologiques, peuvent avoir un impact sur la nature de la végétation. Les usages humains actuels ou sub-actuels jouent, bien sûr, un rôle majeur dans la répartition de la flore. Des facteurs naturels de divers ordres peuvent aussi en être la cause. Ce formulaire n'est qu'une aide à l'interprétation. Il permet de facilement caractériser les milieux sans avoir à entreprendre de recherches approfondies sur l'écologie de chaque espèce. Il ne doit être utilisé que comme un outil : il n'apporte pas de réponses franches sur la présence/absence de structures archéologiques mais fournit de précieuses clés d'aide au raisonnement. La présence « anormale » de certains types d'espèces ou de caractéristiques particulières du milieu est ainsi mise en évidence, c'est à l'utilisateur d'en chercher les causes, qui ne sont pas forcément de nature archéologique.

- **Nécessité d'une lecture préalable de la végétation**

Comme tout outil de terrain d'analyse de la végétation, il ne dispense pas de réaliser une étude préalable de celle-ci. Il est nécessaire de prendre du recul avant de réaliser les relevés. L'utilisateur doit avoir une vision d'ensemble de la flore. Il faut prendre le temps d'observer les différences et de repérer des anomalies. La forme de celles-ci ou leur arrangement entre elles peut déjà apporter de nombreux éléments de réponse. Des anomalies linéaires ou organisées de façon géométrique ont de grandes chances d'avoir une origine archéologique. La nature est rarement organisée naturellement de façon géométrique. Une fois ces anomalies détectées, des relevés de la flore peuvent être effectués. Ils doivent être réalisés au niveau de ces anomalies. Des relevés témoins doivent absolument être effectués. C'est dans la

comparaison à ces témoins que cet outil révèle toute son utilité. Il permet de décrypter la nature de ces anomalies et leur écologie. Cette écologie comparée, à celle de l'environnement immédiat, peut alors renseigner sur les causes de la présence de cette flore particulière.

- **Nécessité d'une bonne connaissance de la flore locale**

Comme mentionné précédemment, une erreur de détermination peut amener à de fausses interprétations. Cet outil nécessite une bonne connaissance de la flore, ou au moins de l'utilisation des outils de détermination. Il permet de faciliter la bioindication, mais il n'en demeure pas moins un outil de spécialistes en botanique. Il peut également être utilisé par les archéologues qui se sont formés à la botanique et savent utiliser une flore. Tout utilisateur doit surtout reconnaître ses limites en cas d'hésitation, lors de la détermination d'une espèce. Dans ce cas précis, mieux vaut ne pas la saisir.

10.3 Perspectives

10.3.1 Un outil au service de la prospection archéologique et de l'interprétation des sites archéologiques

L'intérêt premier de cet outil est son application lors des prospections archéologiques. Les différents indicateurs de bioindication étudiés dans cette thèse ont été intégrés dans ce formulaire. Ce sont ceux qui peuvent potentiellement être influencés par la présence de structures. Chacun de ces indicateurs a été choisi parce qu'il pouvait apporter des éléments de réponse. Ils sont tous en liens avec les trois grandes modalités envisagées à l'origine de cette flore particulière sur les structures archéologiques : introduction d'espèces, favorisation de ces espèces, stades dynamiques différents de la végétation. Cet outil permet de repérer des changements écologiques induits par un de ces trois facteurs. Il peut par conséquent révéler la présence de structures archéologiques.

Outre la prospection, il permet également d'aider à l'interprétation de sites connus. En effet, la flore n'est pas homogène au sein d'un même site. Son étude peut permettre de localiser plus précisément des structures ou différentes aires d'activité au sein du site. L'étude écologique de ces différences de flore peut renseigner sur la nature de ces structures ou de ces usages. Cet outil peut alors être utilisé pour choisir l'implantation de sondages.

10.3.2 Un outil au service des paléobotanistes

L'outil n'est pas figé. Il peut également servir aux paléoenvironnementalistes. Il suffira pour cela de changer le niveau de détermination. En effet, dans les disciplines paléobotaniques, la détermination à l'espèce est souvent impossible. La détermination d'indices moyens pour les genres ou les familles, pourra permettre une utilisation de cet outil dans ces disciplines, mais entraînera bien sûr une perte en finesse des indices. Afin de favoriser dans le calcul les déterminations plus poussées, un facteur de pondération devra être utilisé. Un taxon généraliste pourra ainsi avoir une influence moindre dans le calcul qu'un taxon déterminé de manière plus précise. Ce facteur de pondération pourra être, soit lié au

niveau de détermination, soit de manière judicieuse, lié à l'hétérogénéité des indices des espèces au sein de ce groupe. Etant donné l'agrégation de taxons, il sera indispensable de valider un tel modèle avec des données test avant toute utilisation.

10.3.3 Un outil au service des écologues

Cet outil peut bien entendu servir à tous les écologues qui représenteront sûrement le public le plus nombreux. La bioindication est principalement une discipline d'écologues. Les indices utilisés ici sont fréquemment utilisés dans ce domaine. Cet outil sera pour eux un moyen de faciliter la mise en œuvre d'analyses qu'ils réalisent déjà. Il peut par exemple permettre à certains écologues de se sensibiliser à cette nouvelle discipline qu'est la phytoarchéologie. Cela peut contribuer à renforcer ou instaurer des liens entre les acteurs de l'archéologie et ceux de l'écologie.

10.3.4 Un outil qui peut et doit évoluer

L'outil, comme il a été dit précédemment, n'est pas figé. Il n'est pas parfait car il existe notamment des problèmes de nomenclatures. Ainsi, prenons le cas d'une espèce courante : le fusain. La plupart des botanistes utilisent en latin pour cette espèce la nomenclature *Euonymous europaeus* L. Seulement dans la base INPN, cette espèce est notée comme s'appelant *Evonymous europaeus* L. Cette mutation du *u* en *v* est liée à C. von Linné lui-même (Rickett, 1948 ; Zijlstra & Tolsma, 1991). La première fois où il aurait dénommé cette espèce, il aurait écrit son nom avec un *v* et ensuite toutes les autres fois avec un *u*. Toujours est-il que les règles de la nomenclature du code de Sydney fixant le nom définitif à *Evonymous* n'ont pas été respectées partout. Le problème est que cette nuance n'est pas intégrée dans les synonymes de la base INPN. Pour cet outil, la reconnaissance des espèces entre chaque table n'a pas été réalisée manuellement mais sous forme de requêtes. Par conséquent, on ne voit aucune entrée écologique pour cette espèce dans la plupart des bases. Les seules données sont celles de J.-C. Gégout qui utilisent cette nomenclature INPN. Toutes les autres bases sont muettes alors que des entrées existent sous le nom d'*Euonymous europaeus* L. La base INPN a des chances d'évoluer avec le temps pour corriger ce genre de problèmes. Cet outil aura à évoluer avec elle et avec les évolutions de nomenclature. Il peut aussi évoluer en fonction des besoins de chacun. Certains indices non utilisés ici peuvent être utiles ; d'autres utilisés peuvent l'être moins, suivant l'utilisation qui en est faite. C'est donc à chacun de connaître ses besoins et d'adapter l'outil à sa démarche personnelle. La base INPN, et donc l'ensemble des espèces de la flore française, a été intégrée afin que l'outil dépasse le cadre de cette thèse et puisse, comme il a été dit précédemment, servir à tous ceux qui y trouveront une utilité.

Conclusion

La base de données développée dans le cadre de cette thèse a démontré que la bioindication peut permettre la détection des occupations archéologiques. Les progrès technologiques font qu'il est maintenant possible d'embarquer une telle base sur le terrain,

dans un ordinateur portable. Dans l'optique de cette mise en application, un formulaire dynamique a été développé.

La saisie des relevés se réalise facilement à l'aide de menus déroulants. Les indices de bioindication sont calculés directement lors de cette saisie. Ils s'affichent sur le formulaire sous forme de graphiques simples en bâtons : l'écologie du relevé apparaît instantanément. Pour chaque indice, la valeur moyenne de l'ensemble des relevés de l'étude concernée est aussi affichée sous forme de barre seuil en rouge. La comparaison visuelle des valeurs observées à ces seuils indique la présence d'anomalies : des écarts importants peuvent révéler la présence de structures archéologiques sous-jacentes. Ces anomalies peuvent avoir une origine différente. En ce sens, cet outil peut être utilisé dans les autres disciplines de l'écologie végétale.

Il est conseillé, pour chaque relevé, d'avoir un retour sur les données brutes. Des sous-formulaires, permettant cet accès, ont été développés pour une utilisation raisonnée de cet outil.

Chapitre 11 Conclusion générale

11.1 Rappel du cadre de l'étude et de ses objectifs

11.1.1 Une archéologie et une écologie en demande de phytoarchéologie

Les archéologues sont confrontés à l'inefficacité des méthodes classiques de prospection en milieux semi-naturels. Les sites archéologiques présents dans ces milieux sont pourtant particulièrement intéressants car ils ont échappé aux labours profonds et sont souvent bien conservés. La présence récurrente de certaines espèces végétales sur les occupations anciennes comme le buis est connue des archéologues. Ils imaginent pouvoir utiliser la flore comme nouvelle méthode de prospection dans ces milieux : la prospection botanique. La demande envers les écologues est forte. Ces derniers se tournent de plus en plus vers les archéologues : l'écologie est en mutation. Pour mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes, l'homme et le « temps long » sont sollicités.

11.1.2 Des résultats de DEA prometteurs

C'est dans ce cadre que j'ai effectué mon DEA (Lemouland, 2002), qui traitait du lien entre des habitats gallo-romains et la végétation forestière au sein du massif de Haye (Meurthe-et-Moselle). A l'échelle du massif forestier, des différences de flore sont apparues en fonction de la proximité aux structures. La flore révèle sur les structures un milieu *a priori* plus riche et plus fermé. Des différences de flore ont été pressenties en fonction de la typologie des structures : la flore est différente à proximité du réseau de voirie. Ces résultats sont restés à l'état de corrélation spatiale. Etant donné l'échelle d'étude et l'absence d'analyses de sols, il n'a pu être mis en évidence de liens de causalité : un facteur extérieur tel que la topographie ou le type de sol peut être à l'origine d'un choix dans l'implantation des occupations à l'époque gallo-romaine et expliquer les différences de flore observées.

11.1.3 Des questions en suspens

A l'issue de cette étude, se posait la question de l'origine de cette corrélation spatiale, ou comment les occupations anciennes ont-elles un impact sur la flore actuelle ? Il n'apparaissait pas sûr que ce lien pressenti ne soit pas dû au hasard : une observation anecdotique induite par l'étude à l'échelle du paysage. Il devenait nécessaire d'étudier la nature du lien entre structures et végétation. Pour cela, la question de l'échelle d'étude se posait. Le milieu forestier n'était peut-être pas le plus adapté pour résoudre cette question. L'observation de différences de flore sur la voirie posait les bases d'un éventuel rôle de la typologie des structures et des aires d'occupation sur la nature de la flore. De la même manière, l'observation de caractéristiques écologiques différentes sur les structures archéologiques interpellait quant à l'existence de conditions particulières sur les sites archéologiques en général. Cela laissait envisager la naissance d'une prospection botanique non plus basée sur une espèce comme l'imaginait les archéologues mais sur l'ensemble de la végétation. La question de la mise en pratique de cette prospection botanique se posait alors. Ce travail de thèse a tenté de résoudre une large part de ces interrogations.

11.2 Moyens mis en œuvre

11.2.1 Analyse bibliographique

Pour répondre à ces questions en suspens, il a tout d'abord fallu mener une analyse bibliographique poussée sur l'existence d'observations similaires. Cette démarche permet de statuer sur la pertinence du lien observé en forêt de Haye entre la flore et les occupations archéologiques et autorise à définir éventuellement une nouvelle discipline à part entière.

Le fragon (*Ruscus aculeatus* L.) est une espèce observée de manière récurrente sur les sites archéologiques. Il a été décidé, a travers l'analyse bibliographique de cette espèce, de rechercher les modalités possibles pouvant expliquer les différences de flore observées sur les structures.

11.2.2 Sélection des sites

Afin de répondre aux problèmes d'échelle et de milieux d'étude, il a été nécessaire de faire une synthèse sur les critères de choix des sites et leur méthode d'analyse. Les contraintes botaniques et archéologiques doivent être intégrées. Il est nécessaire d'étudier des sites avérés, peu enfouis et holocènes. Les sites où une étude archéologique est prévue doivent être privilégiés. Le choix du milieu végétal est important. L'échelle d'étude de la flore doit correspondre à celles des occupations archéologiques. Les perturbations actuelles doivent être minimes. La présence de zones témoins, épargnées par les occupations, est indispensable. Pour décider de l'implantation des zones d'étude, l'analyse archéologique préalable, par des méthodes non destructrices comme l'analyse microtopographique ou la prospection géophysique, doivent être envisagées.

Quatre sites ont été retenus : La Montagne (Visseiche, Ille-et-Vilaine), où un enclos médiéval est coupé par une haie ; Le Goënidou (Berrien, Finistère), un habitat médiéval couvert par une lande à fougères ; Kervédan (Groix, Morbihan), un éperon barré protohistorique littoral dans un milieu de pelouse aérohaline ; les habitats médiévaux de la forêt de Pont-Calleck (Berné, Morbihan), où des pieds de fragon ont été repérés.

11.2.3 Etude des sites retenus

Pour chaque site, l'analyse a commencé par l'étude de la flore. La démarche a été similaire pour les sites du Goënidou et de Kervédan : des relevés phytoécologiques de la flore vasculaire ont été effectués. Seules les espèces ligneuses ont été analysées à La Montagne, par repérage des pieds au sein de la haie. Les pieds de fragon de Pont-Calleck ont été cartographiés par photographies verticales.

Pour Le Goënidou et Kervédan, l'analyse de l'ensemble de la flore permet de réaliser des synthèses écologiques des relevés. Une base de données a fourni, à l'aide de requêtes, des indices de bioindication présentant les caractéristiques de la flore et du milieu.

En dehors du site de La Montagne, des prélèvements de sols ont été effectués sur chaque site. Au Goënidou et à Kervédan, l'échantillonnage, au centre de chaque relevé, a concerné l'horizon de sol A1. A Pont-Calleck, tous les horizons ont été prélevés. Des mesures physico-chimiques de ces sols ont été effectuées en laboratoire. Elles ont concerné les propriétés de

drainage, d'acidité, de matière organique et phosphore, ainsi que de complexe d'échange cationique.

L'analyse archéologique du Goënidou s'est limitée à une analyse microtopographique. Pour les autres sites, il y a eu des fouilles. Celles-ci sont antérieures à l'étude, dans le cas de La Montagne.

Pour chaque site, toutes les données ont été synthétisées par des cartes et des analyses statistiques appropriées.

11.3 Principaux résultats

11.3.1 Définition d'une nouvelle discipline : la phytoarchéologie

L'étude bibliographique a révélé que, dans le monde entier, de nombreux auteurs ont observé une flore particulière sur les occupations archéologiques. Certains auteurs ont proposé des noms à cette discipline. Le terme de phytoarchéologie, introduit par R.R. Brooks me paraît le plus adapté (Brooks, 1989 ; Brooks & Johannes, 1990). L'étude peut être étendue à l'ensemble des êtres vivants. Dans cette optique, il faudrait alors parler de bioarchéologie. Ce terme est souvent employé à tort à la place de celui d'archéobiologie par les paléoenvironnementalistes. Il me parait nécessaire de redéfinir clairement la bioarchéologie comme l'étude des êtres vivants au niveau des occupations archéologiques.

11.3.2 Existence de causes multiples pouvant expliquer les anomalies phytoarchéologiques

Différentes modalités à l'origine des anomalies phytoarchéologiques peuvent être avancées. Les espèces particulières aux sites ont pu être introduites, intentionnellement ou non, au moment des occupations archéologiques et avoir perduré depuis. Les propriétés mécaniques, calorifiques, alimentaires, ornementales, médicinales ou symboliques particulières de ces espèces peuvent être à l'origine des introductions volontaires. Des espèces, présentes déjà dans le milieu, ont pu être favorisées par les activités humaines passées pour les mêmes raisons. L'homme attire malgré lui tout un lot d'espèces animales commensales qui peuvent aussi avoir joué un rôle dans les différences de flore observées. En modifiant l'environnement physique, les occupations ont pu favoriser certaines espèces. Les anomalies phytoarchéologiques observées peuvent aussi révéler des différences d' « âge » de la végétation dues à un abandon différentiel entre espace agraire et espace domestique, ou à des dynamiques d'évolution de la flore différentes entre les occupations et l'environnement immédiat. Les vitesses de colonisation différentes sont généralement liées à des modes de dispersion des espèces différents. Un stade dynamique avancé peut aussi être dû à un milieu initialement plus riche qui attire plus facilement des espèces de milieux fermés. L'étude du fragon *Ruscus aculeatus* L. montre que toutes ces modalités sont envisageables et que les causes des anomalies phytoarchéologiques peuvent être complexes.

11.3.3 Impact flagrant des occupations archéologiques sur la flore

L'analyse des sites étudiés dans cette thèse montre à chaque fois des différences de flore

sur les occupations, quels que soient l'échelle, le milieu d'étude et le type de site archéologique. Aux échelles où ont été effectuées les études, les facteurs physiques du milieu sont stables. Cela permet d'affirmer que les occupations anciennes ont un impact sur la répartition actuelle de la flore. Dans les cas du Goënidou et de Kervédan, où l'ensemble de la flore a été étudié, il est même possible de dire que la présence/absence de structures est le premier facteur explicatif des variations de flore observées. Cela se traduit par des différences de fréquences ou d'abondance. La typologie a aussi un rôle important : la flore diffère entre structures ou aires d'activité différentes. L'impact des occupations archéologiques sur la flore peut être direct s'il y a eu introduction d'espèces, ou indirect si les espèces reflètent une adaptation à une modification globale de l'environnement. L'étude de la flore montre l'existence de phénomènes de compétition interspécifique. La présence d'espèces dominantes ayant une répartition particulière vis-à-vis des structures influence la répartition des autres espèces et renforce les différences. Cela brouille cependant la compréhension des mécanismes sous-jacents. L'intégration par la flore de l'impact des occupations semble dépendante du degré de fermeture du milieu : dans un milieu fermé, la végétation ne révèle plus les structures mais uniquement les aires d'activité.

11.3.4 Impact récurrent des occupations archéologiques sur les sols

L'analyse des sols des sites du Goënidou, de Kervédan et de Pont-Calleck montre que les occupations archéologiques ont bouleversé durablement les cycles biogéochimiques. Il n'y a pas de modifications équivalentes entre les sites. Chaque site a ses particularités. Au Goënidou, un impact de l'habitat sur l'ensemble des propriétés des sols a été mis en évidence. A Pont-Calleck, les sites, pourtant équivalents du point de vue archéologique, ne montrent pas les mêmes différences : seules les concentrations en phosphore et l'acidité semblent modifiées. L'éperon barré de Kervédan ne montre des différences nettes qu'en termes d'humidité sur les structures en creux. Sur ce site, d'autres modifications semblent exister entre anciennes aires d'activité, qui n'ont pu être caractérisées par la fouille, du fait de l'absence de sols conservés. Les différences physico-chimiques des sites semblent surtout être dues à des transferts de matière entre aires d'activité pendant l'occupation. Elles peuvent aussi, en partie, être dues à un éventuel impact de la flore actuelle sur les sols.

L'analyse conjointe avec la flore révèle que ces perturbations du sol peuvent en partie expliquer l'impact des occupations anciennes sur la végétation actuelle. Sur chaque site, les sols des occupations sont potentiellement plus favorables aux végétaux : les ressources en eau ou en nutriments sont plus disponibles et l'acidité est moindre. En forêt de Pont-Calleck, la présente de très fortes teneurs en phosphore permet d'émettre l'hypothèse que le fragon est une espèce phosphorophile.

11.3.5 Différences de flore observées dues à des sols plus favorables sur les occupations, entraînant une fermeture du milieu

Sur Le Goënidou et Kervédan, l'analyse de l'écologie des espèces apporte des réponses sur

l'origine des anomalies phytoarchéologiques observées. A part le cas discutable de la jonquille au Goënidou, aucune espèce ne semble être le témoin d'introductions anciennes. Il n'y a pas non plus d'espèces qui auraient pu être favorisées par les activités humaines pendant l'occupation des sites. Les anomalies observées sont dues à la modification durable des sols. La présence de plus de ressources, en nutriments sur les bâtiments du Goënidou, ou en eau sur les structures en creux de Kervédan, est à l'origine des différences de flore. Cet enrichissement occasionne un saut dans les successions végétales et serait à l'origine de la fermeture du milieu observée, comme le suggère l'hypothèse de ressource-ratio de D. Tilman (Tilman, 1985).

La présence d'une flore de milieux plus riches et plus fermés sur les occupations avaient déjà été observée en forêt de Haye lors de mon DEA (Lemouland, 2002). Cette coïncidence ne peut être fortuite. Ces trois sites concernent des périodes d'occupation différentes s'étalant sur une période lonque de plus de quinze siècles : Protohistoire, Antiquité et Moyen-Age. Ils sont situés dans des milieux végétaux différents : pelouse littorale, lande, forêt. Les substrats géologiques sont aussi variés : calcaire pour la forêt de Haye et roches métamorphiques « acides » pour les sites de cette thèse. Ces trois sites ont été étudiés à des échelles différentes : à l'échelle des structures pour Kervédan, à celles des aires d'activité pour Le Goënidou et à celle du paysage pour la forêt de Haye. Malgré toutes ces différences, la réponse de la flore est la même : il y a une meilleure disponibilité des ressources sur les occupations archéologiques qui entraîne une fermeture du milieu.

11.4 Perspectives

11.4.1 Confirmer le caractère métallophytique de la flore des structures

Il serait utile de confirmer la présence récurrente d'une plus forte proportion d'espèces métallophytes sur les occupations archéologiques. Deux solutions intéressantes peuvent être envisagées. La première serait d'appliquer la méthode adoptée dans cette thèse aux données de DEA sur la forêt de Haye. Cela permettrait de statuer rapidement sur le caractère indicateur des pseudométallophytes, et de voir si ceux-ci peuvent être utilisés en prospection. Depuis mon DEA, un passage LIDAR a été réalisé sur l'ensemble du massif. Il serait bon de refaire l'analyse à partir de ces nouvelles données, plus fiables. La deuxième méthode, plus analytique, serait de mesurer les concentrations en métaux lourds sur un échantillon des prélèvements de sols réalisés. Il serait possible de voir si ces pseudométallophytes reflètent des pollutions par ces éléments. La même démarche pourrait bien sûr être adoptée pour la forêt de Haye dans le cas où les pseudométallophytes seraient aussi plus fréquents sur structures. La forêt de Haye a fait l'objet d'activités minières récentes qu'il faudrait prendre en compte dans le cas d'une telle analyse.

11.4.2 Mettre en application la prospection botanique sur le terrain

La récurrence de la présence d'une flore de milieux riches et fermés sur les occupations archéologiques laisse présager que la bioindication peut être utilisée comme un outil de

prospection botanique. Dans cette optique, un formulaire de bioindication a été développé au sein de la base de données développée dans cette thèse. En embarquant cette base dans un ordinateur portable, il est possible de saisir les relevés directement sur le terrain et de les caractériser à l'aide des indices de bioindication calculés. Pour chaque indice, la comparaison des valeurs observés aux valeurs moyennes de l'ensemble des relevés permet d'identifier rapidement les relevés présentant une écologie particulière. Cela peut permettre de repérer sur le terrain d'éventuelles anomalies phytoarchéologiques.

Une telle démarche pourrait être réalisée en amont ou lors de diagnostics d'archéologie préventive. Les relevés devront être effectués au niveau de taches ou de discontinuités visibles dans la végétation associées à des relevés témoins. Les indices de bioindication permettront de statuer sur leur possible origine archéologique. La confirmation rapide de ces hypothèses par la fouille permettrait de valider l'efficacité de cet outil assez facilement. Cela permettrait aussi de constater si des améliorations doivent être apportées à ce logiciel.

11.4.3 Croiser les bases de données archéologiques et botaniques existantes

Il serait intéressant d'appliquer cet outil aux bases de données botaniques existant au niveau régional (données des Conservatoires Botaniques Nationaux ayant servi à l'élaboration des atlas floristiques) ou national (IFN, Sophy). Cette démarche permettrait de mettre en évidence les stations présentant une écologie particulière pouvant révéler la présence d'occupations anciennes. La comparaison de ces bases de données avec la carte archéologique des SRA permettrait de vérifier l'existence de sites connus dans ces zones. Dans le cas où aucun site ne serait connu, une vérification sur le terrain permettrait éventuellement de découvrir de nouveaux sites. Dans ce cas, ces bases pourraient devenir un outil de prospection à une échelle régionale voire nationale.

Toutefois, à ces échelles d'étude, il n'est pas prouvé que ce lien entre occupations et végétation sera encore visible. Il faudrait alors croiser les deux types de bases de données avec toutes les précautions à prendre dans de pareils cas : problèmes d'identification et de localisation inhérents à chacune de ces bases. Cela permettrait éventuellement de mettre en évidence des espèces caractéristiques des occupations à une échelle globale.

Pour des espèces cibles comme le fragon, ces bases de données de végétation permettraient aussi de vérifier la présence éventuelle d'occupations archéologiques. Cette démarche a déjà commencé sur *Sedum telephium*, connu aussi comme poussant préférentiellement sur structures, à l'aide des données ayant servi à l'élaboration de l'atlas floristique d'Ille-et-Vilaine[117]. Une station en forêt de Rennes était facilement repérable puisqu'elle indiquait le numéro de deux parcelles forestières. Il a été décidé, en aveugle, sans consulter la carte archéologique, de suivre la limite séparant ces deux parcelles. Il est apparu très vite que cette limite recoupe doublement le système de talus/fossé d'une enceinte en terre au centre de laquelle est située une motte castrale. Ce site est bien connu du Service Régional d'Archéologie de Bretagne et a déjà fait l'objet de relevés et de sondages, mais il est

[117] Données fournies par L. Diard du Conseil Général d'Ille-et-Vilaine.

intéressant de noter comment, à partir de tels inventaires, il est possible de découvrir des occupations archéologiques. Lors de la visite de l'enceinte, *Sedum telephium* n'a finalement pu être retrouvé, du fait de la visite du site en hiver. A notre grande surprise, un gros bosquet de fragon est observable juste à proximité de la motte et bien d'autres espèces réputées caractéristiques des occupations archéologiques.

11.4.4 Elargir l'étude à l'ensemble des êtres vivants

Lors des études menées pendant cette thèse, il a été remarqué que l'ensemble de l'écosystème semblait modifié. La faune des sols, notamment, semble différente sur les structures. Au Goënidou, dans les prélèvements de sols, quelques vers de terre ont été observés : ils n'étaient présents qu'au niveau des bâtiments. Cela tend à démontrer l'existence de modifications globales de l'écosystème. Les perturbations des sols ont créé des habitats différents pour la faune du sol. Les niveaux trophiques supérieurs semblent aussi perturbés. Des taupinières ont été observées uniquement dans ces zones domestiques. Les taupes se nourrissent des lombrics et sont donc attirées par les zones où ils sont présents : les bâtiments. La présence de ces taupinières a pu être remarquée sur d'autres sites lors des prospections des sites d'étude. Lors du suivi d'un diagnostic de l'INRAP, j'ai remarqué que le seul sondage archéologiquement positif d'une parcelle était au niveau de l'emplacement de taupinières : elles étaient situées au-dessus d'un fossé de l'Age du Fer. Sur d'autres sites, il est apparu certains alignements de taupinières assez éloquents. Ces fouisseurs décompactent les sols sur les occupations et peuvent en partie être à l'origine des différences de flore. Des répartitions différentielles des champignons peuvent aussi être envisagées. Ils peuvent contribuer à l'auto-entretien des différences de sols, par exemple pour les processus de nitrification.

Il serait intéressant d'élargir l'étude à l'ensemble des êtres vivants, pour une meilleure compréhension de l'écosystème des occupations archéologiques. Des collaborations avec des chercheurs des disciplines biologiques concernées seraient nécessaires. Un site comme Le Goënidou semblerait particulièrement adapté à cette démarche. Cela permettrait de donner naissance à la bioarchéologie telle qu'elle a été redéfinie ici.

Bibliographie

Acot, P., 1988: *Histoire de l'écologie.* Presses Universitaires de France, Paris. 285pp.

AFNOR, 1999: *Qualité de sols.* AFNOR, Paris. 566pp.

Arrhenius, O., 1929: Die Phosphatfrage. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde,* **14,** 185-194.

Atzei, A. D., 2003: *Le piante nella tradizione popolare della Sardegna.* Delfino, Sassari. 596pp.

Austin, M. P., 1980: Searching for a model for use in vegetation analysis. *Vegetatio,* **42,** 11-21.

Balée, W., 2006: The research program of historical ecology. *Annual Review of Anthropology,* **35,** 75-98.

Bank, T. P., 1951: Botanical and ethnobotanical studies in the Aleutian Islands. *Papers of the Michigan Academy of Science, Arts, and Letters,* **37,** 13-30.

Bank, T. P., 1953: Ecology of prehistoric aleutian village sites. *Ecology,* **34,** 246-264.

Bardel, J.-P., 1976: Rapport de fouille de sauvetage - Forêt domaniale de Pont-Calleck. *Rapport de sauvetage programmé*. SRA Bretagne, Rennes. 39pp.

Bardel, J.-P., 1977: Rapport de la fouille de sauvetage progammée de l'ensemble médiéval de la coupe 12A - Forêt domaniale de Pont-Calleck en Berné (56). *Rapport de sauvetage programmé*. SRA Bretagne, Rennes. 11pp.

Bardel, J.-P., 1978: Rapport de fouilles de sauvetage programmées - Forêt de Pont-Calleck. *Rapport de sauvetage programmé*. SRA Bretagne, Rennes. 5pp.

Bardel, J.-P., 1980: Rapport de fouille de sauvetage - Forêt domaniale de Pont-Calleck. *Rapport de sauvetage programmé*. SRA Bretagne, Rennes. 3pp.

Bardel, M., 1961: Notes sur la buxaie de Coudrée. *Bulletin de la société botanique de France,* **108,** 61-64.

Barrère, M., 1984: Berrien (Finistère)- Le Goënidou. *Rapport de sauvetage*. SRA Bretagne, Rennes. 15pp.

Barrère, M., 1985: Berrien (29)- Le Goënidou : Village médiéval déserté. *Rapport de sauvetage programmé*. SRA Bretagne, Rennes. 16pp.

Barrère, M. & Batt, M., 1986: Berrien (29) - Le Goënidou : Village médiéval déserté. *Rapport de sauvetage programmé*. SRA Bretagne, Rennes. 9pp.

Batt, M., 2002: Berrien (Finistère) - Le Goënidou : Un habitat déserté du Moyen Age. *Rapport de prospection thématique*. SRA Bretagne, Rennes. 12pp.

Batt, M., 2003: (Finistère) Berrien - Le Goënidou : L'impact d'un habitat médiéval sur le paysage et l'environnement. *Rapport de prospection thématique*. SRA Bretagne, Rennes. 23pp.

Batt, M., 2004: Berrien (Finistère) - Le Goënidou : L'impact d'un habitat médiéval sur le paysage et l'environnement. *Rapport de prospection thématique*. SRA Bretagne, Rennes. 32pp.

Bauch, R., 1937: Vorzeitliche und frühzeitliche Kulturrelikte in der Pflanzenwelt Mecklenburgs. *Behefte zum Botanischen Centralblatt B,* **57,** 77-138.

Beaujean, J., De Leval, J. & Lambinon, J., 1999: *Hepatica nobilis* naturalisée depuis un siècle à Olne (Province de Liège, Belgique), dans un bois riche en plantes castrales. *Natura mosana,* **52,** 65-75.

Becker, M., 1979: Une étude phyto-écologique sur les plateaux calcaires du Nord-Est (massif de Haye-54). *Annales des Sciences forestières,* **36,** 93-124.

Beckes, M. R., Jagler, B. K., Burge, T. L. & Love, T. G., 1982: Possible cultural origin of an isolated stand of *Pinus flexilis* in the Little Missouri Badlands. *Journal of the North Dakota Archaeological Association,* **1**.

Bethell, P., 1989: Chemical analysis of shadow burials. *in: Burial Archaeology : Current Research, Methods and Developments* (eds C. A. Roberts, F. Lee & J. Bintliff), BAR British Series, Oxford**,** 205-214.

Bethell, P. H. & Smith, J. U., 1989: Trace-element analysis of an inhumation from Sutton Hoo, using inductively coupled plasma emission spectrometry: an evaluation of the technique applied to analysis of organic residues. *Journal of Archaeological Science,* **16,** 47-55.

Black, G. A. & Johnston, R. B., 1962: A test of magnetometry as an aid to archaeology. *American Antiquity,* **28,** 199-205.

Bory de Saint-Vincent, J. B., 1825: *Dictionnaire classique d'histoire naturelle.* Rey & Gravier, Baudouin Frères, Paris. 626pp.

Bossuyt, B., Hermy, M. & Deckers, J., 1999: Migration of herbaceous plant species across ancient-recent forest ecotones in central Belgium. *Journal of Ecology,* **87,** 629-638.

Botineau, M. & Vilks, A., 1985: Quelques lichens recoltés sur le site de Chalucet (Haute-Vienne). *Bulletin de la Société Botanique du Centre-Ouest, nouvelle serie,* **16,** 379-380.

Boyer, J.-F., 1984a: *Végétation et structures archéologiques*. Thèse pharmacie, Université de Limoges, Limoges. 137pp.

Boyer, J.-F., 1984b: Végétation et structures archéologiques en Haut-Limousin. *Travaux d'Archéologie Limousine,* **5,** 17-35.

Brandes, D., 1985: Nitrophile Saumgesellschaften in alten Parkanlagen und ihre Bedeutung für den Naturschutz. *Phytocoenologia,* **13,** 451-462.

Brandes, D., 1987: Zur Flora der Burgen im nördlichen Harzvorland. *Braunschweiger Naturkundliche Schriften,* **2,** 797-801.

Brandes, D., 1995: The flora of old town centres in Europe. *in: Urban Ecology as the Basis of Urban Planning* (eds H. Sukopp, M. Numata & A. Huber), SPB Academic Publishing bv, Amsterdam**,** 49-58.

Brandes, D., 1996: Burgruinen als Habitatinseln: Ihre Flora und Vegetation sowie die Bedeutung für Sukzessionsforschung und Naturschutz dargestellt unter besonderer Berücksichtigung der Burgruinen des Harzgebietes. *Braunschweiger Naturkundliche Schriften,* **5,** 125-163.

Brandes, D., 2001: Die ruderalflora der kleinstadt Lüchow (Niedersachsen). *Braunschweiger Naturkundliche Schriften,* **6,** 455-483.

Braun-Blanquet, J., 1964: *Pflanzensoziologie.* Springer, Wien. 865pp.

Brewer, E. C., 1898: *Dictionary of phrase and fable.* Altemus, Philadelphia. 1440pp.

Briggs, J. M., Spielmann, K. A., Schaafsma, H., Kintigh, K. W., Kruse, M., Morehouse, K. & Schollmeyer, K., 2006: Why ecology needs archaeologists and archaeology needs ecologists. *Frontiers in Ecology and the Environment,* **4,** 180-188.

Brisse, H. & Kerguélen, M., 1994: Code Informatisé de la Flore de France (CIFF). *Bulletin de l'Association d'Informatique Appliquée à la Botanique,* **1,** 1-189.

Brooks, R. R., 1989: Phytoarchaeology. *Endeavour,* **13,** 129-134.

Brooks, R. R., 1998: Phytoarchaeology and hyperaccumulators. *in: Plants that hyperaccumulate heavy metals* (ed R. R. Brooks), CAB international, Wallingford**,** 153-180.

Brooks, R. R. & Johannes, D., 1990: *Phytoarchaeology.* Dioscorides Press, Portland. 224pp.

Brun, C., 2007: *Archéophytes et néophytes. Pour une nouvelle détermination des marqueurs polliniques de l'anthropisation. Le cas des milieux cultivés et rudéraux de Franche-Comté.* Thèse sciences de la vie et de l'environnement, Université de Franche-Comté, Besançon. 421pp.

Brunet, J. & Von Oheimb, G., 1998: Migration of vascular plants to secondary woodlands in southern Sweden. *Journal of Ecology,* **86,** 429-438.

Bruun, H. H., non publié: Folklore, fire and flora on Bronze Age burial mounds in Denmark.

Bruun, H. H., Fritzbøger, B., Rindel, P. O. & Hansen, U. L., 2001: Plant species richness in grasslands: the relative importance of contemporary environment and land-use history since the Iron Age. *Ecography,* **24,** 569-578.

Burel, F. & Baudry, J., 2000: *Ecologie du paysage : concepts, méthodes et applications.* Editions Tec & Doc, Londres, New York, Paris 359pp.

Cain, S. A., 1938: The species-area curve. *American Midland Naturalist,* **19,** 573-581.

Caldwell, J. & Wallace, T. J., 1955: Narcissus pseudonarcissus L. *Journal of Ecology,* **43,** 331-341.

Candolle, A., de, 1855: *Géographie botanique raisonnée.* Masson, Kessmann, Paris, Genève. 1365pp.

Caneva, G., Pacini, A., Celesti Grapow, L. & Ceschin, S., 2003: The Colosseum's use and state of abandonment as analysed through its flora. *International Biodeterioration & Biodegradation,* **51,** 211-219.

Caneva, G., Pacini, A., Cutini, M. & Merante, A., 2005: The Colosseum floras as bio-indicators of the climatic changes in Rome. *Climatic Change,* **70,** 431-443.

Cannone, N., 2004: Minimum area assessment and different sampling approaches for the study of vegetation communities in Antartica. *Antartic Science,* **16,** 157-164.

Cassaing, J., Derré, C., Moussa, I., Parghentanian, T., Bocherens, H. & Cheylan, G., 2005: Le régime alimentaire du rat noir *Rattus rattus* dans les îles d'Hyères analysé par la biochimie isotopique et les contenus stomacaux. *Travaux scientifiques du Parc national de Port-Cros,* **21,** 89-116.

Cauvin, 1833: Scéance du 24 juillet - communication de madame Cauvin. *Congrès scientifiques de France,* **1,** 60.

Cazalbou, R., 2001: Sur l'étymologie du mot *bruja*: Interlude botanico-phonétique. *in: Panorama de la linguistique hispanique, Lille 2000* (ed Y. Macchi), Edition du Conseil Scientifique de l'Université Charles-de-Gaulle-Lille 3, Lille**,** 89-98.

Celesti-Grapow, L. & Blasi, C., 2003: I siti archeologici nella conservazione della biodiversità in ambito urbano: la flora vascolare spontanea delle Terme di Caracalla a Roma. *Webbia,* **58,** 77-102.

Celesti-Grapow, L., Pignatti, E. & Pignatti, S., 1993: Ellenbergs zeigerwerte zur ökologischen bewertung der archäologischen zonen in Rom. *Phytocoenologia,* **23,** 291-299.

Celesti-Grapow, L., Pysek, P., Jarosik, V. & Blasi, C., 2006: Determinants of native and alien species richness in the urban flora of Rome. *Diversity and Distributions,* **12,** 490-501.

Celka, Z., 1999: Ros'liny naczyniowe grodzisk Wielkopolski (The Vascular Plant of the Earthworks of Wielkopolska). *Prace Zakladu Taksonomii Ros'lin Uniwersitetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu (Publications of the Department of Plant Taxonomy of the Adam Mickiewicz University in Poznan),* **9,** 1-159.

Celka, Z., 2000: Problems of cultivation relicts. *Prace Zakladu Taksonomii Ros'lin Uniwersitetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu (Publications of the Department of Plant Taxonomy of the Adam Mickiewicz University in Poznan),* **9,** 185-191.

Celka, Z., 2004a: Atlas rozmieszczenia ros'lin naczyniowych na grodziskach Wielkopolski (Distribution Atlas of Vascular Plants on the Earthworks of Wielkopolska). *Prace Zakladu Taksonomii Ros'lin Uniwersitetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu (Publications of the Department of Plant Taxonomy of the Adam Mickiewicz University in Poznan),* **13,** 1-447.

Celka, Z., 2004b: Sites of medieval settlements as refuges for vascular plants. *Ecological Questions,* **4,** 99-104.

Celka, Z., 2005: Relikty dawnych upraw we wspólczesnej florze Polski (Relicts of former cultivation in the present day flora of Poland. *Botanical Guidebooks,* **28,** 281-296.

Celka, Z., 2007: Grasses (Poaceae) and their importance in the flora of archaeological sites. *in: Biological issues in grasses* (ed L. Frey), Szafer Insitute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków**,** 99-108.

Celka, Z. & Drapikowska, M., 2008: Relics of cultivation in Central Europe: *Malva alcea* L. as an example. *Vegetation History and Archaeobotany,* **17,** 251-254.

Celka, Z., Drapikowska, M., Buckzowska, K., Bacziewicz, A. & Marciniak, J., 2006a: Morphological variability of Malva alcea L. populations from Poland. *Scripta Facultatis Rerum Naturalium Universitatis Ostraviensis,* **163,** 159-165.

Celka, Z., Szkudlarz, P. & Biereznoj, U., 2006b: Morphological variation of hairs in *Malva alcea* L. (Malvaceae). *Biodiversity: Research and Conservation,* **3-4,** 258-261.

Ceschin, S., Salerno, G. & Caneva, G., 2009: Multitemporal floristic analysis on a humid area in Rome's archaeological site as indicator for environmental change. *Environmental Monitoring and Assessment,* **149,** 29-42.

Chamboredon, S. & Forey, E., 2002: *Architecture et ontogénèse de deux plantes à ramification basale de la végétation méditerranéenne: Ruscus aculeatus & Euphorbia chararcias*. Maîtrise biologie des populations et des écosystèmes, Université de Montpellier 2, Montpellier. 20pp.

Charles-Lavauzelle, P., 2000: Les ifs anciens des possessions du prieuré d'Aureil: recherches sur leur fonction. *Travaux d'Archéologie Limousine,* **20,** 121-126.

Chassagne, M., 1956: *Inventaire analytique de la flore d'Auvergne et contrées limitrophes des départements voisins (I).* Lechevallier, Paris. 458pp.

Chassagne, M., 1957: *Inventaire analytique de la flore d'Auvergne et contrées limitrophes des départements voisins (II).* Lechevallier, Paris. 542pp.

Chatin, A., 1861a: Note sur les plantes du vieux château de Gisors et des environs. *Bulletin de l'Académie Impériale de Médecine,* **26,** 3-16.

Chatin, A., 1861b: Sur les plantes des vieux châteaux. *Bulletin de la Société Botanique de France,* **8,** 359-365.

Chevalier, A., 1951: Sur une campanule à fleurs blanches naturalisée sur les murs d'un ancien château en Basse Normandie. *Bulletin de la société botanique de France,* **98,** 212.

Christmann, J., 1970: Botanique et Archéologie: utilité de la botanique dans la recherche des ruines gallo-romaines en forêt d'Yveline. *Mémoire et Documents de la Société Historique et Archéologique de Rambouillet et de l'Yveline,* **33,** 35-42.

Chronopoulos, G. & Christodoulakis, D., 2000: Analysis of the adventive flora of a Greek city: the example of Patras. *Botanica Helvetica,* **110,** 171-189.

Clark, A. B., 1968: Vegetation on archaeological sites compared with non-site locations at Walnut Canyon, Flagstaff, Arizona. *Plateau,* **40,** 77-90.

Clements, F. E., 1916: Plant succession. *Carnegie Institution of Washington Publication,* **242,** 1-512.

Clements, F. E., 1936: Nature and Structure of the Climax. *Journal of Ecology,* **24,** 252-284.

Collectif, 1803: *Nouveau dictionnaire d'histoire naturelle.* Deterville, Paris. 576pp.

Conill, L., 1910: *Botanique catalane pratique.* Comet, Perpignan. 382pp.

Connel, J. H., 1978: Diversity in tropical rain forest and coral reefs. *Science,* **199,** 1302-1310.

Connel, J. H. & Slatyer, R. O., 1977: Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. *The American Naturalist,* **111,** 1119-1144.

Conway, J. S., 1983: An investigation of soil phosphorus distribution within occupation deposits from a Romano-British hut group. *Journal of Archaeological Science,* **10,** 117-128.

Cook, S. R., Fulford, M., Clarke, A. & Pearson, C., 2003: Soil geochemical analyses as an indication of metal working at the excavation of a house in the Roman City at Silchester (UK). *Journal de physique. IV,* **107,** 319-321.

Cook, S. R. & Heizer, R. F., 1965: Studies on the chemical analysis of archaeological sites. *University of California Publications in Anthropology 2,* **2,** 1.

Cooper, W. S., 1913a: The climax forest of Isle Royale, Lake Superior, and its development. I. *Botanical Gazette,* **55,** 1-44.

Cooper, W. S., 1913b: The climax forest of Isle Royale, Lake Superior, and its development. II. *Botanical Gazette,* **55,** 115-140.

Cooper, W. S., 1913c: The climax forest of Isle Royale, Lake Superior, and its development. III. *Botanical Gazette,* **55,** 189-235.

Cooper, W. S., 1926: The fundamentals of vegetational change. *Ecology,* **7,** 391-413.

Coppey, A., 1908: Rapport sur les Muscinées recueillies au cours des excursions de la Société durant la session extraordinaire d'août 1908. *Bulletin de la société botanique de France,* **8,** 161-177.

Couderc, J.-M., 1983: Les végétations anthropogènes et nitrophiles et la prospection archéologique. *Colloques phytosociologiques de Bailleul : Végétations nitrophiles,* **XII,** 331-347.

Couderc, J.-M., 1984: Voies et chemins gallo-romains. *Archéologia,* **191,** 62-65.

Couderc, J.-M., 1985: Végétation anthopogène et prospection archéologique. *Revue Archéologique du Centre de la France,* **24,** 53-61.

Coudun, C., 2005: *Approche quantitative de la réponse écologique des espèces végétales forestières à l'échelle de la France*. Thèse Sciences de l'environnement, ENGREF, Nancy. 121pp.

Courson, A., de, 1863: *Cartulaire de l'abbaye de Redon en Bretagne.* Imprimerie impériale, Paris. 760pp.

Cowles, H. C., 1899a: The ecological relations of the vegetation on the sand dunes of lake Michigan (I). *Botanical Gazette,* **27,** 95-117.

Cowles, H. C., 1899b: The ecological relations of the vegetation on the sand dunes of lake Michigan (II). *Botanical Gazette,* **27,** 167-202.

Cowles, H. C., 1899c: The ecological relations of the vegetation on the sand dunes of lake Michigan (III). *Botanical Gazette,* **27,** 281-308.

Cowles, H. C., 1899d: The ecological relations of the vegetation on the sand dunes of lake Michigan (IV). *Botanical Gazette,* **27,** 361-391.

Craddock, P. T., Gurney, D., Pryor, F. & Hugues, M. J., 1985: The Application of Phosphate Analysis to the Location and Interpretation of Archaeological Sites. *Archaeological Journal,* **142,** 361-376.

Crowther, J., 1997: Soil phosphate surveys: critical approaches to sampling, analysis and interpretation. *Archaeological Prospection,* **4,** 93-102.

Crozat, S., 1994: *Les apports de l'ethnobotanique en archéologie médiévale dans le Nord-Ouest du Cantal*. Maîtrise histoire de l'Art, Université de Lyon 2, Lyon. 133pp.

Crozat, S., 1999: Les données de le flore actuelle: ethnobotanique et archéologie. *in: la botanique* (ed A. Ferdière), éditions errance, Paris**,** 171-187.

Cuvier, F. G., 1822: *Dictionnaire des sciences naturelles.* Levrault & Le Normant, Strasbourg, Paris. 483pp.

D'Antuono, L. F. & Lovato, A., 2003: Germination trials and domestication potential of three native species with edible sprouts: *Ruscus aculeatus* L., *Tamus communis* L. and *Smilax aspera* L. *Acta Horticulturae,* **598,** 211–218.

Dall, W. H., 1877: On succession in the shell-heaps of the Aleutian Islands. *Contributions to North American Ethnology,* **1,** 41-91.

Dambrine, E., Dupouey, J.-L., Laüt, L., Humbert, L., Thinon, M., Beaufils, T. & Richard, H., 2007: Present forest biodiversity patterns in France related to former Roman agriculture. *Ecology,* **88,** 1430-1439.

Dardignac, C., 2005: Rapport de prospection archéologique, Forêt domaniale de Pont-Calleck (Morbihan, commune de Berné). *Rapport de prospection thématique* SRA Bretagne, Rennes. 45pp.

Darwin, C., 1846: *Journal of researches into the natural history and geology of the countries visited during the voyage of H.M.S. Beagle round the world.* Harper & Brothers, New-York. 351+324pp.

Day, G. M., 1953: The indian as an ecological factor in the northeastern forest. *Ecology,* **34,** 329-346.

De Plaen, G., Malaisse, F. & Brooks, R. R., 1982: The `copper flowers' of Central Africa and their significance for prospecting and archaeology. *Endeavour,* **6,** 72-77.

Deakin, R., 1855: *Flora of the Colosseum of Rome.* Groombridge & sons, London. 237pp.

Decocq, G., 1998: Prospections botaniques autour du site archéologique de Boves. *Bulletin de la Société Linnéenne Nord Picardie,* **16,** 34-35.

Decocq, G., 2004: Utilisation de la flore et de la végétation actuelles en prospection archéologique. *in: Méthodes et initiations d'histoire et d'archéologie* (eds P. Racinet & J. Schwerdroffer), éditions du temps, Nantes**,** 55-71.

Decocq, G., Vieille, V. & Racinet, P., 2002: Influence des facteurs historiques sur la végétation actuelle: le cas des mottes castrales en milieu forestier (Picardie, France). *Acta botanica gallica,* **149,** 197-215.

Deconchat, M. & Balent, G., 2001: Effets des perturbations du sol et de la mise en lumière occasionnées par l'exploitation forestière sur la flore à une échelle fine. *Annals of forest science,* **58,** 315-328.

Dehnen-Schmutz, K., 1998: Medieval castles as centers of spread of non-native plant species. *in: Plant invasions: ecological mechanisms and human responses* (eds U. Starfinger, K. Edwards, I. Kowarik & M. Williamson), Backhuys Publishers, Leiden**,** 307–312.

Dehnen-Schmutz, K., 2000: Non-native Species at Medieval Castles as Cultural Heritage. *Wildland Weeds,* **4,** 4-7.

Dehnen-Schmutz, K., 2001: Neophytes in the rock vegetation around medieval castles in Germany. *in: Biological Invasions in Germany. A Challenge to Act?* (eds I. Kowarik & U. Starfinger), BfN Scripten 32, Bonn**,** 69-70.

Dehnen-Schmutz, K., 2004: Alien species reflecting history: medieval castles in Germany. *Diversity & Distributions,* **10,** 147-151.

Delétang, 1998: La prospection aérienne à basse altitude. *in: La prospection* (ed A. Ferdière), Errance, Paris**,** 91-128.

Delisle, L. & Passy, L., 1862: *Mémoires et notes de M. Auguste Le Prevost pour servir à l'histoire du département de l'Eure.* Hérissey, Evreux. 576pp.

Denbow, J. R., 1979: *Cenchrus ciliaris*: an ecological indicator of Iron Age middens using aerial photography in Eastern Botswana. *South African Journal of Science,* **75,** 405-408.

Denslow, J. S., 1980: Patterns of plant diversity during succession under different disturbance regimes. *Oecologia,* **46,** 18-21.

Derry, A. M., Kevan, P. G. & Rowley, S. D. M., 1999: Soil nutrients and vegetation characteristics of a Dorset/Thule site in the Canadian arctic. *Arctic,* **52,** 204-213.

Des Moulins, C., 1865: *Note sur la lettre de M. Alph. de Rochebrune.* Le Blanc-Hardel, Caen. 19pp.

Desbordes, B., 1996: *Contribution à l'étude de la végétation sur des sites archéologiques limousins aux époques gallo-romaine et médiévale.* Thèse pharmacie, Université de Limoges, Limoges. 129pp.

Desbordes, J.-M., 1973: Principes d'Archéologie Forestière. *Archeologia,* **59,** 60-65.

Desbordes, J.-M., 1975: Principes d'Archéologie Forestière. *Revue d'Histoire et d'Art de la Brie et du Pays de Meaux,* **26,** 19-30.

Desbordes, J.-M., 1980: Pour une Eco-archéologie. *Archeologia,* **141,** 43-52.

Desfontaines, R. L., 1809: *Histoire des arbres et arbrisseaux qui peuvent être cultivés en pleine terre sur le sol de la France.* Brosson, Paris. 493pp.

Direction régionale de l'environnement Bretagne & Conseil régional de Bretagne, 1999: *La Bretagne: des hommes, un territoire.* Direction régionale de l'INSEE, Rennes. 99pp.

Dizerbo, A.-H., 1962: Remarques sur l'origine et la répartition du Buis - (*Buxus sempervirens* L.) Buxacées. *Penn Ar Bed,* **3,** 219-221.

Domont, P. & Montelle, E., 2003: *Histoires d'arbres - des sciences aux contes.* Delachaux & Niestlé, ONF, Paris. 256pp.

Duhourcau, B., 1985: *Guide des Pyrénées mystérieuses.* Sand, Paris. 653pp.

Dupouey, J. L., Dambrine, E., Dardignac, C. & Geoges-Leroy, M., 2007: *La mémoire des forêts.* ONF, INRA, DRAC Lorraine, Fontainebleau. 294pp.

Dupouey, J. L., Dambrine, E., Laffite, J. D. & Moares, C., 2002: Irreversible impact of past land-use on forest soils and biodiversity. *Ecology,* **83,** 2978-2984.

Duvigneaud, J., 1990: Quelques observations floristiques effectuées à proximité du château de Houx (Yvoir, province de Namur, Belgique). *Natura mosana,* **43,** 10-14.

Duvigneaud, J., 1991: Un haut lieu pour les plantes castrales: le site de Saint-Berthauld à Chaumont-Porcien (Département des Ardennes, France). *Natura mosana,* **44,** 49-54.

Duvigneaud, J. & Leurquin, J., 1994: Le parc de Paridaens à Beaumont (province du Hainaut, Belgique) et ses plantes castrales. *Natura mosana,* **47,** 75-80.

Duvigneaud, J. & Saintenoy-Simon, J., 1993: Le parc du château de Xhos à Tavier (Province de Liège, Belgique): une belle station de plantes castrales. *Natura mosana,* **46,** 102-108.

Ebers, G., 1875: *Papyros Ebers: Das hermetische Buch über die Arzeneimittel der alten Agypter in hieratische Schrift.* Engelmann, Leipzig. 110pp.

Ellenberg, H., Weber, H. E., Düll, R., Wirth, V., Werner, W. & Paulissen, D., 1992: Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica,* **18,** 1-258.

Elton, C., 1927: *Animal ecology.* Sidgwick & Jackson, London. 209pp.

Entwistle, J. A. & Abrahams, P. W., 1997: Multi-element analysis of soils and sediments from scottish historical sites. The potential of Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry for rapid site investigation. *Journal of Archaeological Science,* **24,** 407-416.

Entwistle, J. A., Abrahams, P. W. & Dodgshon, R. A., 1998: Multi-element analysis of soils from Scottish historical sites. Interpreting land-use history through the physical and geochemical analysis of soil. *Journal of Archaeological Science,* **25,** 53-68.

Entwistle, J. A., Abrahams, P. W. & Dodgshon, R. A., 2000a: The geoarchaeological significance and spatial variability of a range of physical and chemical soil properties from a former habitation site, isle of Skye. *Journal of Archaeological Science,* **27,** 287-303.

Entwistle, J. A., Dodgshon, R. A. & Abrahams, P. W., 2000b: An investigation of former land-use activity through the physical and chemical analysis of soils from the Isle of Lewis, Outer Hebrides. *Archaeological Prospection,* **7,** 171-188.

Escofier, B. & Pagès, J., 2008: *Analyses factorielles simples et multiples.* Dunod, Paris. 318pp.

Fanelli, G., Tescarollo, P. & Testi, A., 2006: Ecological indicators applied to urban and suburban floras. *Ecological Indicators,* **6,** 444-457.

Faurel, L., 1947: Remarques sur quelques plantes des vieux châteaux du Quercy, et notamment sur l'*Alyssum edentulum* du château d'Assier (Lot). *Bulletin de la société botanique de France,* **94,** 21-27.

Ferdière, A., 1998: *La prospection.* Editions Errance, Paris. 223pp.

Ferdière, A. & Zadora-Rio, E., 1982: *La prospection archéologique : paysage et peuplement.* Maison des sciences de l'homme, Paris. 178pp.

Fitter, A. H. & Peat, H. J., 1994: The ecological flora database. *Journal of Ecology,* **82,** 415-425.

Folan, W. J., Fletcher, L. A. & Kintz, E. R., 1979: Fruit, fiber, bark, and resin: social organisation of a Maya urban center. *Science,* **204,** 697-701.

Folkard, R. J., 1884: *Plant-lore legends and lyrics.* Sampson Low, Marston & Co., London. 610pp.

Follain, S., 2005: *Effet du réseau bocager sur l'organisation des sols. Redistribution des sols et stockage en carbone organique.* Thèse Sciences de l'Environnement, ENSAR, Rennes. 241pp.

Forbes, B. C., 1996: Plant communities of archaeological sites, abandonned dwellings and trampled tundra in the eastern Canadian arctic: a multivariate analysis. *Arctic,* **49,** 141-154.

Gause, G. F., 1932: Experimental studies on the struggle for existence: I. mixed population of two species of yeast. *Journal of Experimental Biology,* **9,** 389-402.

Gégout, J.-C., 1995: *Etude des relations entre les ressources minérales du sol et la végétation forestières dans les Vosges*. Thèse biologie forestière, Univiversité de Nancy 1, Nancy. 215+110pp.

Gégout, J.-C., 2006: *Distribution et caractère bioindicateur des espèces végétales forestières françaises vis-à-vis du sol et du climat.* HDR Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy. 109pp.

Ghestem, A., 2002: La flore des vestiges archéologiques en Limousin: proposition de synthèse. *Travaux d'Archéologie Limousine,* **22,** 7-21.

Ghestem, A., 2006: Sites archéologiques et végétation: l'exemple du limousin. *Travaux d'Archéologie Limousine,* **Supplément 7,** 1-100.

Ghestem, A., Botineau, M. & Descubes-Gouilly, C., 1994: La flore originale de la villa gallo-romaine du Boin (commune de Saint-Eloy-Les-Tuileries, Corrèze). *Travaux d'Archéologie Limousine,* **14,** 7-16.

Ghestem, A., Botineau, M. & Descubes, C., 1993: Recherche d'espèces végétales indicatrices de sites archéologiques fossilisés en Limousin. *Travaux d'Archéologie Limousine,* **13,** 19-27.

Ghestem, A., Botineau, M. & Descubes, C., 2006: La villa gallo-romaine du Boin (Commune de Saint-Eloy-les-Tuileries, Corrèze): étude des relations entre le site archéologique et la végétation. *Lemouzi,* **178,** 22-30.

Ghestem, A., Botineau, M., Froissard, D. & Hourdin, P., 2003: La voie romaine d'Orléans à Sens: analyse de son impact sur la flore forestière et comparaison avec la flore des vestiges gallo-romains Limousins. *Travaux d'Archéologie Limousine,* **23,** 17-28.

Ghestem, A., Desbordes, B., Descubes, C. & Froissard, D., 1997a: La végétation d'un site fortifié du bas Moyen Age: l'exemple du château de Ventadour (commune de Moustier-Ventadour, Corrèze). *Travaux d'Archéologie Limousine,* **17,** 7-17.

Ghestem, A., Desbordes, B., Descubes, C. & Hourdin, P., 2000: Analyse floristique et pédochimique de deux sites archéologiques de la commune de Châteauponsac (Haute-Vienne). *Travaux d'Archéologie Limousine,* **20,** 17-23.

Ghestem, A., Desbordes, B., Hourdin, P. & Froissard, D., 1997b: La végétation de deux sites archéologiques fossilisés d'époque gallo-romaine: la Charrière des Buis et Montignat. *Mémoires de la Société des Sciences naturelles et archéologiques de la Creuse,* **46,** 213-223.

Ghestem, A., Friossard, D., Descubes, C. & Hourdin, P., 1999: Etude des relations entre sol et végétation sur des sites gallo-romains du Haut-Limousin. *Travaux d'Archéologie Limousine,* **19,** 7-16.

Ghestem, A. & Vilks, A., 1979: La végétation de quelques sites archéologiques en Limousin. *Revue Archéologique du centre de la France,* **71-72,** 137-148.

Ghestem, A., Vilks, A., Hourdin, P. & Botineau, M., 1996: Anomalies botaniques du site de la Grange, commune de Saint-Fréjoux (Corrèze). *Travaux d'Archéologie Limousine,* **16,** 15-20.

Gilmore, M. R., 1931: Dispersal by indians: a factor in the extension of discontinuous distribution of certain species of native plants. *Papers of the Michigan Academy of Science, Arts, and Letters,* **13,** 89-94.

Gleason, H. A., 1917: The structure and the development of the plant association. *Bulletin of the Torrey Botanical Club,* **44,** 463-481.

Gounot, M., 1969: *Méthodes d'étude quantitative de la végétation.* Masson, Paris. 314pp.

Griffith, M. A., 1980: A pedological investigation of an archaeological site in Ontario, Canada, I: An examination of the soils in and adjacent to a former village. *Geoderma,* **24,** 327-336.

Griffith, M. A., 1981: A pedological investigation of an archaeological site in Ontario, Canada, II: use of chemical data to discriminate features of the Benson Site. *Geoderma,* **25,** 27-34.

Grime, J. P., 1974: Vegetation classification by reference to strategies. *Nature,* **250,** 26-31.

Grime, J. P., 1977: Evidence for the Existence of Three Primary Strategies in Plants and Its Relevance to Ecological and Evolutionary Theory. *The American Naturalist,* **111,** 1169-1194.

Grime, J. P., 1979: *Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties.* Wiley & sons, LTD, Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto. 417pp.

Grinnell, J., 1917: The Niche-Relationships of the California Thrasher. *The Auk,* **34,** 427-433.

Grøntved, P., 1962: Om plantevæksten pa nogle sydsjaellandske kæmpehøje. *Botanisk Tidssckrift,* **58,** 50-63.

Guinier, P. & Maire, R., 1908: Rapport sur les excursions de la Société botanique de France en Lorraine (Juillet-août 1908) : Spermatophytes, Ptéridophytes et Champignons. *Bulletin de la société botanique de France,* **8,** 69-150.

Haeckel, E., 1866: *Generelle Morphologie der Organismen.* Reimer, Berlin. 574+462pp.

Hardin, G., 1960: The competitive exclusion principle. *Science,* **131,** 1292-1297.

Hardouin, 1833: Scéance du 24 juillet - communication de monsieur Hardouin. *Congrès scientifiques de France,* **1,** 56-59.

Hayashida, F. M., 2005: Archaeology, ecological history, and conservation. *Annual Review of Anthropology,* **34,** 43-65.

Hermy, M., Honnay, O., Firbank, L., Grashof-Bokdam, C. & Lawesson, J. E., 1999: An ecological comparison between ancient and other forest plant species of Europe, and the implications for forest conservation. *Biological Conservation,* **91,** 9-22.

Herrera, C. M., 1982: Breeding systems and dispersal-related maternal reproductive effort of southern Spanish bird-dispersed plants. *Evolution,* **36,** 1299-1314.

Herrera, C. M., 1984: A study of avian frugivores, bird-dispersed plants, and their interaction in Mediterranean scrublands. *Ecological Monographs,* **54,** 1-23.

Hill, M. O., Preston, C. d. & Roy, D. B., 2004: *PLANTATT - Attributes of British and Irish Plants: Status, Size, Life History, Geography and Habitats.* Centre for Ecology & Hydrology, Huntingdon. 73pp.

Hill, M. O., Roy, D. B. & Thompson, K., 2002: Hemeroby, urbanity and ruderality: bioindicators of disturbance and human impact. *Journal of Applied Ecology,* **39,** 708-720.

Hillegers, H. P. M., 1985: De stinzenflora van Zuid-Limburg. *Rin rapport,* **85,** 1-53.

Hillman, E. M., 1979: A study of Ruscus aculeatus on Bookham Common. *The London Naturalist,* **58,** 44-55.

Hillman, E. M. & Warren, A., 1973: Survey of Ruscus aculeatus on Bookham Common: the first two years. *The London Naturalist,* **52,** 93-103.

Hodgson, J. G., Wilson, P. J., Hunt, R., Grime, J. P. & Thompson, K., 1999: Allocating C-S-R plant functional types: a soft approach to a hard problem. *Oikos,* **85,** 282-294.

Homsey, L. K. & Capo, R. C., 2006: Integrating geochemistry and micromorphology to interpret feature use at Dust Cave, a Paleo-Indian through middle-archaic site in Northwest Alabama. *Geoarchaeology,* **21,** 237-269.

Hooper, M. D., 1976: Historical and biological studies on English hedges. *in: Table ronde CNRS: les bocages, histoire, écologie, économie*, Rennes**,** 225-227.

Hopkins, W. G., 1995: *Introduction to plant physiology.* Wiley & sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapour. 464pp.

Hrdlička, A., 1937: Man and plants in Alaska. *Science,* **86,** 559-560.

Humbert, L., 2002: *Relation entre l'utilisation du sol à l'époque gallo-romaine et la biodiversité actuelle en forêt de Tronçais*. Maîtrise Biologie des Populations et des Ecosystèmes, Université de Nancy1, Nancy. 42pp.

Hutchinson, G. E., 1957: Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology,* **22,** 415 - 427.

Jalas, J., 1955: Hemerobe und hemerochore Pflanzenarten - Ein terminologischer Reformversuch. *Acta Societatis pro Fauna et Flora Fennica,* **72,** 1-15.

James, P., 1999: Soil variability in the area of an archaeological site near Sparta, Greece. *Journal of Archaeological Science,* **26,** 1273-1288.

Jannet, A., 2002: Biodiversité forestière et patrimoine archéologique. *Les Dossiers d'Archéologie,* **284,** 11.

Jannet, A., 2003: *Biodiversité et archéologie, la mémoire des hommes et des milieux*. DEA Environnement et Archéologie, Université de Paris 10, Paris. 52pp.

Jansen, M. T. & van der Ploeg, D. T. E., 1985: Stinzenplanten in Nederland. *Wetenschappelijke mededeling KNNV,* **122,** 1-48.

Jauzein, P., 2001a: Biodiversité des champs cultivés: l'enrichissement floristique. *in: Dossiers de l'Environnement de l'INRA n°21: Agriculture et biodiversité des plantes* (eds S. Le Perchec, P. Guy & A. Fraval), Paris**,** 43-64.

Jauzein, P., 2001b: L'appauvrissement floristique des champs cultivés. *in: Dossiers de l'Environnement de l'INRA n°21: Agriculture et biodiversité des plantes* (eds S. Le Perchec, P. Guy & A. Fraval), Paris**,** 65-76.

Jepson, W. L., 1909: *The trees of California.* Cunningham, Curtis & Welch, San Francisco. 228pp.

Jochelson, W., 1925: *Archaeological investigations in the Aleutian Islands.* University of Utah Press, Salt Lake City. 192pp.

Jussy, J. H., Koerner, W., Dambrine, E., Dupouey, J. L. & Benoit, M., 2002: Influence of former agricultural land use on net nitrate production in forest soils. *European Journal of Soil Science,* **53,** 367-374.

Kami'nski, D., 2006: Floristic diversity on the early medieval earthworks of Chelmno Land (Ziema Chelmi'nska) in NW Poland. *Biodiversity: Research and Conservation,* **3-4,** 344-347.

Karr, A., 1860: *La pêche en eau douce et en eau salée.* Lévy frères, Paris. 320pp.

Kay, Q. O. N. & Page, J., 1985: Dioecism and pollination in Ruscus aculeatus. *Watsonia,* **15,** 261-264.

Kerguélen, M., 1993: Index synonymique de la Flore de France. *Secrétariat de la Faune et de la Flore, Collection Patrimoines naturels,* **8,** 1-196.

Kirschleger, F., 1862a: *Flore d'alsace et des contrées limitrophes.* Baillière, Strasbourg, Paris. 456pp.

Kirschleger, F., 1862b: Sur les plantes des vieux châteaux dans la région Alsato-Vosgienne. *Bulletin de la société botanique de France,* **9,** 15-18.

Knapp, C., Borel, M. & Attinger, V., 1908: *Dictionnaire géographique de la Suisse.* Attinger frères, Neuchâtel.

Knudson, K. J., Frink, L., Hoffman, B. W. & Price, T. D., 2004: Chemical characterization of Arctic soils: activity area analysis in contemporary Yup'ik fish camps using ICP-AES. *Journal of Archaeological Science,* **31,** 443-456.

Koerner, W., Dambrine, E., Dupouey, J. L. & Benoît, M., 1999: $d^{15}N$ of forest soil and understorey vegetation reflect the former agricultural land use. *Oecologia,* **121,** 421-425.

Koerner, W., Dupouey, J. L., Dambrine, E. & Benoit, M., 1997: Influence of past land use on the vegetation and soils of present day forest in the Vosges mountains, France. *Journal of Ecology,* **85,** 351-358.

Konrad, V. A., Bonnichsen, R. & Clay, V., 1983: Soil chemical identification of ten thousand years of prehistoric human activity areas at the Munsungun Lake Thoroughfare, Maine. *Journal of Archaeological Science,* **10,** 13-28.

Krigas, N. & Kokkini, S., 2004: A survey of the alien vascular flora of the urban and suburban area of Thessaloniki, N Greece. *Willdenowia,* **34,** 81-99.

Krigas, N., Lagiou, E., Hanlidou, E. & Kokkini, S., 1999: The vascular flora of the Byzantine walls of Tessaloniki (N Greece). *Willdenowia,* **29,** 77-94.

La Fons de Mélicocq, A., Baron de, 1856: Encore un mot sur le Buis. *Bulletin de la Société Botanique de France,* **3,** 536-537.

La Fouchardière, M., de, 1962: La buxeraie de Coat-an-Noz. *Penn Ar Bed,* **3,** 217-218.

Lambert, J. D. H. & Arnason, J. T., 1982: *Ramòn* and Maya ruins: an ecological, not an economic, relation. *Science,* **216,** 298-299.

Lambert, J. D. H. & Arnason, T., 1978: Distribution of vegetation on Maya ruins and its relationship to ancient land-use at Lamanai, Belize. *Turrialba,* **28,** 33-41.

Lapeyre, O., 2005: *Plantes médiévales du jardin ethnobotanique d'Antignac (Cantal).* "Avena" Maison du partrimoine archéologique, Antignac. 150pp.

Lapeyre, O. & Dodinet, E., 1982: L'homme et la plante. *Bulletin du groupe de recherches historiques et archéologiques de la vallée de la Sumène,* **26-27,** 1-96.

Le Mière de Corvey, M. F. A., 1824: Liste alphabétique de quelques mots en usage à Rennes (*Ille-et-Vilaine*). *in: Mémoires et dissertation sur les antiquités nationales et étrangères*Smith, Paris**,** 235-272.

Le Roux, C.-T., 1975: Circonscription de Bretagne. *Gallia Préhistoire,* **18,** 511-539.

Le Roux, C.-T., 1977: Circonscription de Bretagne. *Gallia Préhistoire,* **20,** 407-432.

Lemouland, Q., 2002: *Impact du parcellaire gallo-romain sur la flore actuelle en forêt de Haye (54): nouveaux outils pour la prospection et la détermination du risque archéologique en milieu forestier*. DEA environnement et archéologie, Université de Paris 10, Paris. 48pp.

Lenormant, F., 1856: De la naturalisation du Buis. *Bulletin de la Société Botanique de France,* **3,** 224-226.

Léon, J., 1864: Botanique industrielle des succédanés. *Bulletin de la société d'agriculture, sciences et arts de Poligny (Jura),* **5,** 114-117.

Leonardi, G., Miglavacca, P. D., Mara & Nardi, S., 1999: Soil phosphorus analysis as an integrative tool for recognizing buried ancient ploughsoils. *Journal of Archaeological Science,* **26,** 343-352.

Leroi-Gourhan, A., 1975: The flowers found with Shanidar IV, a néandertal burial in Iraq. *Science,* **190,** 562-564.

Leroux, G., 1992: Bassin oriental de la Vilaine et ses marges. *Rapport de prospection inventaire*. SRA Bretagne, Rennes.

Leroux, G., 1993: Bassin oriental de la Vilaine et ses marges. *Rapport de prospection inventaire*. SRA Bretagne, Rennes.

Levins, R., 1968: *Evolution in changing environment.* Princeton University Press, New Jersey. 120pp.

Liebig, J., 1840: *Organic chemistry in its applications to agriculture and physiology.* Taylor & Walton, London. 387pp.

Lindborg, R. & Eriksson, O., 2004: Historical landscape connectivity affects present plant species diversity. *Ecology,* **85,** 1840-1845.

Linderholm, J. & Lundberg, E., 1994: Chemical characterization of various archaeological soil samples using main and trace elements determined by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry. *Journal of Archaeological Science,* **21,** 303-314.

Linderman, R. L., 1942: The trophic-dynamic aspect of ecology. *Ecology,* **23,** 399-417.

Lohmeyer, W. & Sukopp, H., 1992: Agriophyten in der Vegetation Mitteleuropas. *Schriftenreihe für Vegetationskunde,* **25,** 1-185.

Lohmeyer, W. & Sukopp, H., 2001: Agriophyten in der Vegetation Mitteleuropas. 1. Nachtrag. *in: Adventivpflanzen. Beiträge zur Biologie, Vorkommen und Ausbreitungsdynamik von Archäophyten und Neophyten in Mitteleuropa* (ed D. Brandes), Universitätsbibliothek Braunschweig, Braunschweig**,** 179-220.

López González, G., 2002: *Guía de los árboles y arbustos de la Península Ibérica y Baleares.* Mundi-Prensa, Madrid. 894pp.

MacArthur, R. H. & Pianka, E. R., 1966: On optimal use of a patchy environment. *The American Naturalist,* **100,** 603.

MacArthur, R. H. & Wilson, E. O., 1967: *The theory of island biogeography.* Princeton University Press, Princeton.

MacDougall, A., 2003: Did Native Americans influence the northward migration of plants during the Holocene? *Journal of Biogeography,* **30,** 633-647.

Malaisse, F. & Brooks, R., 1982: Colonisation of modified metalliferous environments in Zaïe by the copper flower *Haumaniastrum katangense*. *Plant and Soil,* **64,** 289-293.

Malthus, T. R., 1798a: *An essay on the principle of population, or, a view of its past and present effects on human happiness (I).* Weightman, Washington. 510pp.

Malthus, T. R., 1798b: *An essay on the principle of population, or, a view of its past and present effects on human happiness (II).* Weightman, Washington. 542pp.

Marchal, J.-Y., 1978: Vestiges d'occupation ancienne au Yatenga (Haute-Volta): une reconnaissance du pays Kibga. *Cahiers de l'ORSTOM, série Sciences Humaines,* **15,** 449-484.

Marguerie, D. & Hunot, J.-Y., 2007: Charcoal analysis and dendrology: data from archaeological sites in north-western France. *Journal of Archaeological Science,* **34,** 1417-1433.

Marrs, R. H. & Watt, A. S., 2006: Biological flora of the British Isles: *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn. *Journal of Ecology,* **94,** 1272-1321.

Matlack, G. R., 1994: Plant Species Migration in a Mixed-History Forest Landscape in Eastern North America. *Ecology,* **75,** 1491-1502.

Matlack, G. R., 2005: Slow plants in a fast forest: local dispersal as a predictor of species frequencies in a dynamic landscape. *Journal of Ecology,* **93,** 50-59.

Mattioli, P. A., 1579: *Commentaires de M. Pierre André Matthiole medecin senois, sur les six livres de Pedacius Dioscorides (1st latin ed. 1570).* Rouillé, Lyon.

McCartney, N. G., 1976: *Effects of eskimos on soils and vegetation at two northern archaeological sites*. Thèse botanique, Université de Wisconsin-Madison, Madison. 652pp.

McCartney, N. G., 1978: Lichens from three archaeological sites, Somerset Island, N.W.T., Canada. *the Bryologist,* **81,** 610-613.

McCartney, N. G., 1979: Effects of Thule Eskimos on soils and vegetation at Silumiut, N.W.T. *in: Thule Eskimo culture: an athropological retrospective* (ed A. P. McCARTNEY), National Museum of Canada, Archaeological Survey of Canada Mercury Series n°88**,** 495-507.

McCollin, D., Jackson, J. I., Bunce, R. G. H., Barr, C. J. & Stuart, R., 2000: Hedgerows as habitat for woodland plants. *Journal of Environmental Management,* **60,** 77-90.

Meigs, P. I., 1938: Vegetation on shell mounds, Lower California. *Science,* **87,** 346.

Metcalfe, D. J., 2005: *Hedera helix* L. *Journal of Ecology,* **93,** 632-648.

Meuret, J.-C., 2003: La Montagne, Visseiche (Ille-et-Vilaine). *Rapport de fouille programmée*. SRA Bretagne, Rennes. 36pp.

Meuret, J.-C., 2004: La Montagne, Visseiche (Ille-et-Vilaine). *Rapport de fouille programmée*. SRA Bretagne, Rennes. 34pp.

Meuret, J.-C., 2006a: La Montagne, Visseiche (Ille-et-Vilaine). *Rapport de fouille programmée*. SRA Bretagne, Rennes. 60pp.

Meuret, J.-C., 2006b: Visseiche, vingt-cinq siècles d'aristocratie : de l'archéologie à l'écrit. *Mémoire de la Société d'Histoire et d'Archéologie de Bretagne,* **84,** 131-180.

Middleton, W. D., 2004: Identifying chemical activity residues on prehistoric house floors: a methodology and rationale for multi-elemental characterization of a mild acid extract of anthropogenic sediments. *Archaeometry,* **46,** 47-65.

Middleton, W. D. & Price, D. T., 1996: Identification of activity areas by multi-element characterization of sediments from modern and archaeological house floors using Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy. *Journal of Archaeological Science,* **23,** 673-687.

Mille, P., 1993: Le choix des essences opéré par les artisans du bois à la fin du Moyen Âge: glossaire. *Revue Forestière Française,* **2,** 165-177.

Miller, P., 1735: *The gardeners dictionary.* Rivington, London.

Milon, Y. & Giot, P.-R., 1949: IV°circonscription. *Gallia,* **7,** 252-256.

Minnis, P. E. & Plog, S. E., 1976: A study of the site specific distribution of *Agave parryi* in east central Arizona. *The Kiva,* **41,** 299-308.

Moog, D., Kahmen, S. & Poschlod, P., 2005: Application of CSR- and LHS-strategies for the distinction of differently managed grasslands. *Basic and Applied Ecology,* **6,** 133-143.

Moret, J.-L., 2006: *Les noms des espèces ligneuses d'Europe moyenne (Arbres, arbustes, arbrisseaux et sous-arbrisseaux indigènes ou fréquemment plantés pour le rapport ou l'ornement).* Editions Rossolis, Bussigny. 256pp.

Morzadec, M.-T., 1982: Apport de l'analyse pollinique à l'archéologie du paysage bocager Armoricain. *Travaux du laboratoire "Anthropologie - Préhistoire - Protohistoire - Quaternaire Armoricains"***,** 61-76.

Moseley, E. L., 1931: Some plants that were probably brought to Northern Ohio from the west by indians. *Papers of the Michigan Academy of Science, Arts, and Letters,* **13,** 169-172.

Nedelcheva, A. M., Dogan, Y. & Guarrera, P. M., 2007: Plants traditionally used to make brooms in several European countries. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine,* **3,** 1-11.

Newman, D. J., Cragg, G. M. & Snader, K. M., 2000: The influence of natural products upon drug discovery. *Natural Product Reports,* **17,** 215-234.

Nielsen, H. B. & Bruun, H. H., 2003: Gravhoje som oer agerlandet: farandringer i floaren 1961 til 2000. *Flora og Fauna,* **109,** 95-100.

Nisard, M., 1864: *Les agronomes latins (Caton, Varon, Columelle, Palladius).* Firmin Didot frères, fils & Cie, Paris. 650pp.

Nore, A., de, 1864: *Coutumes, mythes et traditions des provinces de France.* Perrisse frères, Paris, Lyon. 394pp.

Onaindia, M., Dominguez, I., Albizu, I., Garbisu, C. & Amezaga, I., 2004: Vegetation diversity and vertical structure as indicators of forest disturbance. *Forest Ecology and Management,* **195,** 341-354.

Orbigny, C. H. D., d', 1849: *Dictionnaire universel d'histoire naturelle.* Renard, Martinet &Cie, Paris. 768pp.

Ovington, J. D. & Scurfield, G., 1956: *Holcus Mollis* L. *Journal of Ecology,* **44,** 272-280.

Panaïotis, C., Loisel, R. & Roux, M., 1998: Analyse de la réponse de la végétation aux trouées naturelles dans une futaie âgée de *Quercus ilex* L. en Corse (île Méditerranéenne). *Canadian Journal of Forest Research,* **28,** 1125–1134.

Panaroli, D., 1643: *Jatrologismi sive medicae observationes quibus additus est in fine Plantarum Amphitheatralium Catalogus.* Typis Domicini Marciani, Rome. 15pp.

Parent, G. H., 2002: Etudes écologiques et chorologiques sur la flore lorraine, note 20: le petit houx (Ruscus acoleatus) fait-il encore partie de la flore lorraine ? *Bulletin de l'Académie Lorraine des Sciences,* **41,** 45-57.

Parnell, J. J., Terry, R. E. & Nelson, Z., 2002: Soil chemical analysis applied as an interpretive tool for ancient human activities in Piedras Negras, Guatemala. *Journal of Archaeological Science,* **29,** 379-404.

Pärtel, m., Helm, A., Reitalu, T., Liira, J. & Zobel, M., 2007: Grassland diversity related to the Late Iron Age human population density. *Journal of Ecology,* **95,** 574-582.

Passalacqua, N. G., De Fine, G. & Guarrera, P. M., 2006: Contribution to the knowledge of the veterinary science and of the ethnobotany in Calabria region (Southern Italy). *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine,* **2,** 1-14.

Patten, B. C., 1959: An introduction to the cybernetics of the ecosystem : the trophic-dynamic aspect. *Ecology,* **40,** 221-231.

Pautrat, Y., 2001: Archéologie et forêt: l'expérience bourguignonne. *les nouvelles de l'archéologie,* **86,** 24-27.

Pautrat, Y., 2002: Archéologie en forêt: un patrimoine peu à peu exploré. *Les Dossiers d'Archéologie,* **284,** 18-23.

Perrein, C., 1984: Datation d'un système en réseau construit et planté: la haie vive sur talus. L'utilisation des données botaniques. *Revue de l'Art,* **65,** 9-12.

Perrein, C., 1986: Datation de la haie vive en Vendée. *Dossiers histoire et archéologie,* **106,** 72-73.

Perrein, C., 1987a: *Contribution à l'archéologie des bocages: recherches méthodologiques sur l'utilisation des données botaniques de la haie vive*. Diplôme EHESS, Toulouse. 181pp.

Perrein, C., 1987b: Phytohistoire: les bocages tels un grand jardin. *303. Arts, Recherches et créations,* **14,** 92-96.

Perrein, C., 1991a: Archéologie des bocages: phytohistoire de la haie vive. *in: Pour une archéologie agraire, à la croisée des sciences de l'homme et de la nature* (ed J. Guilaine), Colin, Paris**,** 223-257.

Perrein, C., 1991b: *Prodrome de biohistoire des lieux à Quecus ilex L. dans l'ouest de la France: la phytogéographie et la naissance de l'écologie végétale*. DEA EHESS, Toulouse. 58pp.

Pianka, E. R., 1970: On r- and K-selection. *The American Naturalist,* **104,** 592.

Picault, C., 1993: Opération de mise en valeur du patrimoine archéologique de la Vallée du Scorff. *Rapport carte archéologique*. SRA Bretagne, Rennes.

Pickett, S. T. A., Kolasa, J., Armesto, J. J. & Collins, S. L., 1989: The ecological concept of disturbance and its expression at various hierarchical levels. *Oikos,* **54,** 129-136.

Pickett, S. T. A. & White, P. S., 1985: *The ecology of natural disturbance and patch dynamics.* Academic press, London. 472pp.

Pieroni, A., Nebel, S., Santoro, R. F. & Heinrich, M., 2005: Food for two seasons: Culinary uses of non-cultivated local vegetables and mushrooms in a south Italian village. *International Journal of Food Sciences and Nutrition,* **56,** 245-272.

Pinkerton, J., 1784: *An essay on medals.* Dodsley, London. 324pp.

Porter, D. M., 1987: Darwin's notes on Beagle plants. *Bulletin of the British Museum (Natural History) Historical Series,* **14,** 145-233.

Potter, L. D. & Green, D. L., 1964: Ecology of a northeastern outlying stand of *Pinus flexilis*. *Ecology,* **45,** 866-868.

Prange, W., 1996: Das kleine immergrün (*Vinca minor* L.) in Westdeutschland: eine kulturreliktpflanze aus römischer zeit. *Schriften des Naturwissenschaftlichen Vereins für Schleswig-Holstein,* **66,** 71-96.

Preston, C. D., Pearman, D. A. & Hall, A. R., 2004: Archaeophytes in Britain. *Botanical Journal of the Linnean Society,* **145,** 257-294.

Puleston, D. E., 1971: An experimental approach to the function of Classic Maya chultuns. *American Antiquity,* **36,** 322-335.

Pysek, P., Jarosik, V., Chytry, M., Kropac, Z., Tichy, L. & Wild, J., 2005: Alien plants in temperate weed communities: prehistoric and recent invaders occupy different habitats. *Ecology,* **86,** 772-785.

Rackham, O., 1980: *Ancient woodland: its history, vegetation and uses in England.* Casttlepoint Press, Colvend, Dalbeattie, Kirkcudbrightshire. 584pp.

Rameau, J.-C., Mansion, D., Dumé, G., Timbal, J., Lecointe, A., Dupont, P. & Keller, R., 1989: *Flore forestière française : guide écologique illustré - tome 1: plaines et collines.* Institut pour le Développement Forestier, Paris. 1785pp.

Raunkiær, C., 1904: Om biologiske Typer, med Hensyn til Planternes Tilpasning til at overleve ugunstige Aarstider. *Botanisk Tidssckrift,* **26**.

Raunkiær, C., 1905: Types biologiques pour la géographie botanique. *Bulletin de l'Académie Royale des Sciences et Lettres du Danemark,* **5,** 347-437.

Raunkiær, C., 1907: *Planterigets livsformer og deres Betydning for Geografien.* Munksgaard, Copenhague. 132pp.

Raunkiær, C., 1908: Livsformernes Statistik som Grundlag for biologisk Plantengeografi. *Botanisk Tidssckrift,* **29,** 42-83.

Raunkiær, C., 1926: Vegetationen paa Maglehøj (vest for Arresø) og lidt om vore kæmpehojes flora i det hele taget *Botanisk Tidssckrift,* **39,** 348-356.

Renaux, S., 2003: *L'empreinte gallo-romaine dans la végétation forestière de Compiègne (Oise, France). L'occupation gallo-romaine près de 2000 ans plus tôt a-t-elle définitivement modifié la dynamique forestière ?* Thèse pharmacie, Université de Picadie Jules Verne, Amiens. 74pp.

Renouf, M. A. P., 1985: Archaeological research in the Port au Choix National Historic Parc, Northwest Newfoundland. *Polar Record,* **22,** 693-697.

Renouf, M. A. P., 1986: Archaeological investigation at Phillip's Garden and Point Riche, of the Port au Choix National Historic Park. *Report of 1985 Field Activities.* Memorial University, St. Johns.

Renouf, M. A. P. & Hall, C., 1985: Archaeology of the Port au Choix National Historic Park, northwest Newfoundland. *Report of 1984 Field Activities.* Memorial University, St. Johns.

Ricard, J., 1955: *Le gros souper à marseille: la bûche de Noël, les rites, le menu.* Bibliothèque des traditions locales, Marseille. 117pp.

Richardson, D. M., Pysek, P., Rejmanek, M., Barbour, M. G., Panetta, F. D. & West, C. J., 2000: Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Diversity and Distributions,* **6,** 93-107.

Rickett, H. W., 1948: Orthography in botanical nomenclature. *Brittonia,* **6,** 365-368.

Rickli, M., 1903: Die Anthropochoren und der Formenkreis des *Nasturtium palustre* DC. *Berichte der Schweizerischen Botanischen Gesellschaft,* **13,** 71-82.

Ricotta, C., Celesti Grapow, L., Avena, G. & Blasi, C., 2001: Topological analysis of the spatial distribution of plant species richness across the city of Rome (Italy) with the echelon approach. *Landscape and Urban Planning,* **57,** 69-76.

Rose, F., 1999: Indicators of ancient woodland: the use of vascular plants in evaluating ancient woods for nature conservation. *British Wildlife,* **10,** 241-251.

Roupnel, G., 1932: *Histoire de la campagne française.* Bernard Grasset, Paris. 432pp.

Saint-Venant, J., de, 1888: Voie antiques manifestées par la nature de la végétation. *Mémoires de la Société des Antiquaires du Centre,* **15,** 71-74.

Saint-Venant, J., de, 1889: Vestiges antiques dans la forêt d'Orléans. *Bulletin de la Société Archéologique et Historique de l'Orléanais,* **138,** 370-380.

Sampson, C. G., 1986: Veld damage in the Karoo caused by its pre-trekboer inhabitants: preliminary observations in the Seacow valley. *The Naturalist,* **30,** 37-42.

Sarris, A., Galaty, M., Yerkes, R., Parkinson, W., Gyucha, A., Billingsley, D. M. & Tate, R., 2004: Geophysical prospection and soil chemistry at the early Copper Age settlement of Vészt o-Bikeri, Southeastern Hungary. *Journal of Archaeological Science,* **31,** 927-939.

Saussure, T., de, 1804: *Recherches chimiques sur la végétation.* Nyon, Paris. 327pp.

Sawbridge, D. F. & Bell, M. A. M., 1972: Vegetation and soils of the shell middens on the coast of British Columbia. *Ecology,* **53,** 840-849.

Schlezinger, D. R. & Howes, B. L., 2000: Organic phosphorus and elemental ratios as indicators of prehistoric human occupation. *Journal of Archaeological Science,* **27,** 479-492.

Schröter, C. & Kirchner, O., 1896: Die Vegetation des Bodensees. *Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung,* **25,** 1-112.

Schröter, C. & Kirchner, O., 1902: Die Vegetation des Bodensees. *Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung,* **31,** 1-86.

Sebastiani, A., 1815: *Enumeratio plantarum sponte nascentium in ruderibus Amphiteatri Flavii.* Typis Pauli Salviucci et fillii, Rome. 80pp.

Shannon, C. E. & Weaver, W., 1949: *The mathematical theory of communication.* University of Illinois Press, Urbana. 117pp.

Shelford, V. E., 1913: *Animal communities in temperate America.* University of Chicago Press, Chicago. 346pp.

Sjöberg, A., 1976: Phosphate analysis of anthropic soils. *Journal of Field Archaeology,* **3,** 447-454.

Small, J. K., 1927a: Among floral aborigines (I). *Journal of the New York Botanical Garden,* **28,** 1-20.

Small, J. K., 1927b: Among floral aborigines (II). *Journal of the New York Botanical Garden,* **28,** 25-40.

Smith, W. G., 1913: Raunkiaer's "life-forms" and statistical methods. *Journal of Ecology,* **1,** 16-26.

Solecki, R. S., 1951: Notes on soil analysis and archaeology. *American Antiquity,* **16,** 254-256.

Sullivan, K. A. & Kealhofer, L., 2004: Identifying activity areas in archaeological soils from a colonial Virginia house lot using phytolith analysis and soil chemistry. *Journal of Archaeological Science,* **31,** 1659-1673.

Tanguy, D., 1987: Prospection-inventaire archéologique en zone boisée sur la moyenne vallée du Scorff. *Rapport de prospection-inventaire*. SRA Bretagne, Rennes.

Tansley, A. G., 1935: The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology,* **16,** 284-307.

Tardio, J., Pardo-De-Santayana, M. & Morales, R., 2006: Ethnobotanical review of wild edible plants in Spain. *Botanical Journal of the Linnean Society,* **152,** 27-71.

Taylor, K., Rowland, A. P. & Jones, H. E., 2001: *Molinia caerulea* (L.) Moench. *Journal of Ecology,* **89,** 126-144.

Terry, R. E., Hardin, P. J., Houston, S. D., Nelson, S. D., Jackson, M. W., Carr, J. & Parnell, J., 2000: Quantitative phosphorus measurement: a field test procedure for archaeological site analysis at Piedras Negras, Guatemala. *Geoarchaeology,* **15,** 151-166.

Thellung, A., 1912: *La flore adventice de Montpellier.* Le Maout, Cherbourg. 728pp.

Thomas, P. A. & Polwart, A., 2003: *Taxus bacata* L. *Journal of Ecology,* **91,** 489-524.

Thompson, J. E. S., 1930: Ethnology of the Mayas of southern and central British Honduras. *Publication of the Field Musemn of Natural History, Anthropological Series,* **17,** 1-213.

Threipland, L. M., 1942: Excavations in brittany, spring 1939. *Archaeological Journal,* **100,** 128-149.

Tilman, D., 1985: The ressource-ratio hypothesis of plant succession. *The American Naturalist,* **125,** 827-852.

Tilman, D., 1988: *Plant strategies and the dynamics and structure of plant communities.* Princeton University Press, Princeton. 360pp.

Tonnerre, N.-Y., 2008: *La maison paysanne en Bretagne.* Coop Breiz, Spézet. 255pp.

Tyler, V. E., 2000: Herbal medicine: from the past to the future. *Public Health Nutrition,* **3,** 447-452.

Van Beneden, P. J., 1878: *Les commensaux et les parasites dans le règne animal.* Germer Baillière & Cie, Paris. 238pp.

Van der Maarel, E., 1979: Transformation of cover-abundance values in phytosociology and its effects on community similarity. *Vegetatio,* **39,** 97-114.

Verhulst, P.-F., 1838: Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. *Correspondance Mathématique et Physique,* **4,** 113-121.

Verlot, B., 1861: Note sur quelques arbres remarquables plantés dans le département du Loiret. *Bulletin de la Société Botanique de France,* **8,** 354-358.

Vieille, V., 2001: *Analyses floristique et phytosociologique de la végétation de quelques mottes castrales picardes*. Thèse pharmacie, Université de Picadie Jules Verne, Amiens. 80pp.

Vigneau, T. & Dardignac, C., 2001: Quelles perspectives pour l'archéologie du milieu forestier ? *les nouvelles de l'archéologie,* **86,** 22-23.

Virville, A. D., de, 1935: *Le buis dans le massif Armoricain & la flore des Saulges (Mayenne).* Goupil, Laval. 35pp.

Wagner, P. L., 1964: titre inconnu. *in: Natural environment and early culture* (ed R. C. West), University of Texas Press, Austin**,** 216-264.

Waser, N. M., 1978: Competition for hummingbird pollination and sequential flowering in two Colorado wildflowers. *Ecology,* **59,** 934-944.

Watt, A. S., 1947: Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology,* **35,** 1-22.

Wells, E. C., 2004: Investigating activity patterns in prehispanic plazas: weak acid-extraction ICP-AES analysis of anthrosols at classic period El Coyote, Northwestern Honduras. *Archaeometry,* **46,** 67-84.

Westoby, M., 1998: A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme. *Plant and Soil,* **199,** 213-227.

White, E. M., 1978: Cautionary note on soil phosphate data interpretation for archaeology. *American Antiquity,* **43,** 507-508.

White, P., 1979: Pattern, process, and natural disturbance in vegetation. *The Botanical Review,* **45,** 229-299.

Willis, K. J., Gillson, L. & Brncic, T. M., 2004: How "virgin" is virgin rainforest ? *Science,* **304,** 402-403.

Wilson, C. A., Davidson, D. A. & Cresser, M. S., 2008: Multi-element soil analysis: an assessment of its potential as an aid to archaeological interpretation. *Journal of Archaeological Science,* **35,** 412-424.

Yarnell, R. A., 1965: Implications of distinctive flora on Pueblo ruins. *American Anthropologist,* **67,** 662-674.

Zeiner, H. M., 1944: *Botanical survey of the Angel Mounds site, Evansville, Indiana*. Thèse botanique et bactériologie, Université d'Indiana, Bloomington. 79pp.

Zeiner, H. M., 1946: Botanical survey of the Angel Mounds site, Evansville, Indiana. *American Journal of Botany,* **33,** 83-90.

Zijlstra, G. & Tolsma, J., 1991: (997) Proposal to Conserve the Spelling of 4618 Euonymus (Celastraceae). *Taxon,* **40,** 137-139.

Glossaire des termes écologiques

Acidiphile : espèce ayant une affinité pour les sols acides

Adventice : espèce végétale indésirable, plus communément appelée "mauvaise herbe"

Alloctone : espèce d'origine étrangère à la flore locale

Anémochore : espèce végétale dont les graines sont dispersées par le vent

Anthropochore : espèce végétale dont les graines sont dispersées par l'homme

Anthropophile : espèce ayant une affinité pour les milieux perturbés par les activités humaines

Autécologie : partie de l'écologie étudiant les individus pris séparément dans leurs milieux

Autochore : espèce végétale ayant développé un mode de dispersion actif des graines par propulsion

Barochore : espèce végétale n'ayant pas de mode de dispersion des graines particulier et dont les graines tombent directement au sol

Bilan hydrique : bilan au sein d'un système donné entre les apports d'eau par précipitation et les pertes par évapotranspiration, ruissellement et infiltration

Calcicline : espèce ayant une légère préférence pour les sols riches en calcium

Calcicole : espèce poussant préférentiellement sur les sols riches en calcium

Calcifuge : espèce ne tolérant pas les sols riches en calcium

Chaméphyte : espèce végétale vivace dont les bourgeons sont aériens et situés à moins de 50cm du sol

Cuprophyte : espèce végétale poussant sur les sols cuivreux

Endémique : espèce ne se rencontrant que dans une région géographique donnée

Endomammochore : espèce végétale dont la dispersion des graines se fait après transit intestinal chez des mammifères

Endoornitochore : espèce végétale dont la dispersion des graines se fait après transit intestinal chez des oiseaux

Endozoochore : espèce végétale dont la dispersion des graines se fait après transit intestinal chez des animaux

Epimammochore : espèce végétale dont la dispersion des graines se fait par transport sur le pelage des mammifères

Epiornithochore : espèce végétale dont la dispersion des graines se fait par transport sur le plumage des oiseaux

Epizoochore : espèce végétale dont la dispersion des graines se fait par transport sur le plumage ou le pelage des animaux

Estivale : espèce végétale fleurissant en été

Eumétallophyte : espèce végétale ne poussant que sur des sols métallifères

Euryèce : espèce capable de supporter des variations importantes des facteurs écologiques

Evapotranspiration : quantité d'eau transférée du sol vers l'atmosphère par évaporation et transpiration des plantes

Géophyte : espèce végétale dont les bourgeons sont situés dans le sol

Héliophile : espèce ayant une affinité pour les milieux lumineux

Hémérobie : degré de perturbation humaine

Hémicryptophyte : espèce végétale dont les bourgeons sont situés à la surface du sol

Hydrochore : espèce végétale dont les graines sont dispersées par l'eau

Métallophyte : espèce végétale poussant sur des sols métallifères

Micro-méso-géga-phanérophyte : espèce végétale ligneuse dont les bourgeons sont situés à plus de 50cm du sol et ayant une taille supérieure à 2m

Myrmécochore : espèce végétale dont la dispersion des graines se fait par transport par les fourmis

Nanophanérophyte : espèce végétale ligneuse dont les bourgeons sont situés à plus de 50cm du sol et ayant une taille inférieure à 2m

Néophyte : se dit d'une espèce allochtone introduite après 1500 ap. J.-C.

Neutrocalcicole : espèce poussant préférentiellement sur les sols calcaires à neutres

Neutrocline : espèce ayant une légère préférence pour les sols neutres

Nitrophile : espèce ayant une affinité pour les sols riches, notamment en nitrates

Ombrochore : espèce végétale dont les graines sont dispersées par la pluie

Phanérophyte : espèce végétale ligneuse dont les bourgeons sont situés à plus de 50cm du sol

Phosphorophile : espèce ayant une affinité pour les sols riches en phosphore

Pseudométallophyte : espèce végétale tolérant les sols métallifères

Richesse spécifique : nombre d'espèce au sein d'un relevé

Rudérale : espèce végétale poussant dans des milieux perturbés

Silicicole : espèce poussant préférentiellement sur les sols siliceux

Sténoèce : espèce ne pouvant vivre que dans des conditions de milieu bien définies

Synécologie : partie de l'écologie étudiant les communautés

Thermophile : espèce ayant une affinité pour les milieux chauds

Thérophyte : espèce végétale passant les périodes défavorables sous forme de graines

Ubiquiste : espèce pouvant se rencontrer dans la plupart des milieux

Vernale : espèce végétale fleurissant au printemps

Xénophyte : espèce d'origine étrangère à la flore locale (voire allochtone)

Xérophile : espèce ayant une affinité pour les milieux secs

Zoochore : espèce végétale dont la dispersion des graines se fait par des animaux

Table des illustrations

Liste des tableaux

Tableau 1 - Significativité de l'écart des distances moyennes des espèces ligneuses aux fossés de l'enclos de Visseiche par rapport au modèle spatial aléatoire 145

Tableau 2 - Significativité de l'écart des distances moyennes des espèces ligneuses à l'enclos de Visseiche par rapport au modèle spatial aléatoire agrégatif 148

Tableau 3 - Significativité de l'écart des distances moyennes des espèces ligneuses aux fossés de l'enclos de Visseiche par rapport au modèle spatial aléatoire agrégatif 148

Tableau 4 : AFM du Goënidou : inerties des analyses séparées des groupes actifs 151

Tableau 5 - AFM du Goënidou : inertie des axes, globale et ventilée par groupe actif 151

Tableau 6 - AFM de Kervédan : inerties des analyses séparées des groupes actifs 168

Tableau 7 - AFM de Kervédan : inertie des axes, globale et ventilée par groupe actif 169

Liste des figures

Figure 1 - Imposant pied de fragon présent dans un dolmen ruiné à Saint-Nicolas-des-Glénan (Finistère) 39

Figure 2 - Imposant pied de fragon présent dans un dolmen ruiné à Groix (Morbihan) 40

Figure 3 - Diagramme utilisé pour la représentation des caractères trophiques et hydriques de la flore forestière française (d'après Rameau et al., 1989 : exemple du fragon) 58

Figure 4 - Localisation du site du Goënidou 73

Figure 5 - Plan de fouille de l'îlot d'habitat du Goënidou fouillé de 1984 à 1987 74

Figure 6 - Essai de restitution d'une des maisons mixtes fouillée du Goënidou 75

Figure 7 - Ilot d'habitat restauré du Goënidou 75

Figure 8 - Relevé microtopographique 2004 du site du Goënidou (Source : Batt, 2004) 76

Figure 9 - Environnement géologique du site du Goënidou 77

Figure 10 - Orthophotographie du site du Goënidou 78

Figure 11 - Emplacement de la zone d'étude du site du Goënidou 79

Figure 12 - Localisation du site de La Montagne 80

Figure 13 - Environnement géologique du site de la Montagne 82

Figure 14 - Orthophotographie du site de la Montagne 83

Figure 15 - Emplacement de la zone d'étude du site de La Montagne 84

Figure 16 - Localisation du site de Kervédan 85

Figure 17 - Carte d'emplacement des sondages de 1939 et des structures observées par L.M. Threipland sur le site de Kervédan 86

Figure 18 - Environnement géologique du site de Kervédan 87

Figure 19 - Orthophotographie du site de Kervédan (source : ortholittorale 2000) *88*
Figure 20 - Carroyage de référence du site de Kervédan (maille de 4m) *89*
Figure 21 - Modèle numérique de terrain du site de Kervédan (vue 3D) *89*
Figure 22 - Géoréférencement du plan de L.M.Threipland *90*
Figure 23 - Exemple d'ancien sondage visible dans la végétation *91*
Figure 24 - Anomalies d'intensité du champ magnétique terrestre identifiées *94*
Figure 25 - Exemple de transect obtenu en électrique (transect 7) *95*
Figure 26 - Exemple de variation latérale de conductivité (profondeur: 61cm) *95*
Figure 27 - Emplacement des sondages archéologiques prévus *96*
Figure 28 - Localisation cadastrale des sites de Pont-Calleck *97*
Figure 29 - Localisation parcellaire des sites de Pont-Calleck (Parcellaire ONF) *98*
Figure 30 - Environnement géologique de la forêt de Pont-Calleck *100*
Figure 31 - Orthophotographie de la forêt de Pont-Calleck *101*
Figure 32 - Emplacement des sondages I, II et III au sein du groupement d'habitats désertés n°1 ..... *102*
Figure 33 - Emplacement des sondages V, VI et VII au sein du groupement d'habitats désertés n°2 ..... *103*
Figure 34 - Emplacement du sondage IV au sein du groupement d'habitats désertés n°3 ... *104*
Figure 35 - Courbes aires-espèces des sites du Goënidou et de Kervédan *109*
Figure 36 - Carroyage utilisé pour la réalisation des relevés de végétation du site du Goënidou *110*
Figure 37 - Carroyages utilisés pour la réalisation des relevés de végétation du site de Kervédan *110*
Figure 38 - Structure de la base de données VEG *112*
Figure 39 - Types fonctionnels de Grime (d'après Grime, 1977) : le modèle CSR (Où Ic est l'importance relative de la compétition ; Id l'importance relative de la perturbation ; Is l'importance relative du stress) *117*
Figure 40 - Structure des données d'écologie intégrées dans la base de données VEG *120*
Figure 41 - Structure de la base de données SOL *133*
Figure 42 - Interprétation archéologique structurelle des structures microtopographiques de la parcelle 110 du site du Goënidou *135*
Figure 43 - Interprétation archéologique fonctionnelle des structures microtopographiques de la parcelle 110 du site du Goënidou *135*
Figure 44 - Plan géoréférencé et digitalisé des structures du site de la Montagne *136*
Figure 45 - Exemple de sondage rebouché avec des mottes d'étrépage *137*
Figure 46 - Relation spatiale entre la localisation des pieds des différentes espèces et l'enclos triple au sein de la haie du site de Visseiche *143*

Figure 47 - Comparaison des distances moyennes des espèces ligneuses à l'enclos de Visseiche par rapport au modèle spatial aléatoire 144

Figure 48 - Variation des seuils de significativité (p-value=0.05) des distances moyennes à l'enclos de Visseiche en fonction du nombre de pieds observés 147

Figure 49 - Structure des données de biométrie de la fougère 149

Figure 50 - Cercle des corrélations sur le plan 1-2 de l'ACP de la biométrie de la fougère aigle (en encadré : allure du nuage des relevés) 150

Figure 51 - AFM du Goënidou : structure des données utilisées 150

Figure 52 - AFM du Goënidou : représentation des deux premières composantes principales de chaque groupe actif par leur corrélation avec le premier plan factoriel..... 152

Figure 53 - AFM du Goënidou : carré des liaisons entre les groupes et le premier plan factoriel 153

Figure 54 - AFM du Goënidou : représentation de la typologie sur le premier plan factoriel 154

Figure 55 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des proximités aux différents types de structures et des coordonnées spatiales xy 155

Figure 56 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des proximités aux différents types de structures et des abondances des espèces (les codes utilisés pour les espèces sont ceux de l'annexe 6)..... 156

Figure 57 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des proximités aux différents types de structures et des variabbles biométriques de la fougère aigle 157

Figure 58 : AFM du Goënidou - représentation sur le plan factoriel 1-2 des proximités aux différents types de structures et des variables de biodiversité 158

Figure 59 - Interprétation archéologique de l'orthophotographie verticale du sondage I de Kervédan en fin de fouille 162

Figure 60 - Interprétation archéologique de l'orthophotographie verticale du sondage II de Kervédan en fin de fouille 163

Figure 61 - Interprétation archéologique de l'orthophotographie verticale du sondage III de Kervédan en fin de fouille 163

Figure 62 - Interprétation archéologique de l'orthophotographie verticale du sondage IV de Kervédan en fin de fouille 163

Figure 63 - Interprétation archéologique de l'orthophotographie verticale du sondage V de Kervédan en fin de fouille 164

Figure 64 - Anomalies à Holcus lanatus visibles au niveau des fossés du système de remparts de l'éperon barré de Kervédan (vue du sol)..... 165

Figure 65 - Anomalies à Holcus lanatus visibles au niveau des fossés du système de remparts de l'éperon barré de Kervédan (vue du haut du rempart intérieur) 165

Figure 66 - Effet de l'échelle d'étude sur la perception des relations spatiales entre la présence ou la récurrence de Daucus carota L. et les structures archéologiques du sondage I du site de Kervédan 167

Figure 67 - AFM de Kervédan : structure des données utilisées..... 168

Figure 68 - AFM de Kervédan : représentation des deux premières composantes principales de chaque groupe actif par leur corrélation avec le premier plan factoriel..... 170

Figure 69 - AFM de Kervédan : carré des liaisons entre les groupes et le premier plan factoriel 170

Figure 70 - AFM de Kervédan : représentation de la typologie sur le premier plan factoriel 171

Figure 71 - AFM de Kervédan : représentation des sondages sur le premier plan factoriel 172

Figure 72 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des proximités aux différents types de structures et des coordonnées spatiales xy 173

Figure 73 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des proximités aux différents types de structures et des abondances des espèces (les codes utilisés pour les espèces sont ceux de l'annexe 9)..... 175

Figure 74 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des proximités aux différents types de structures et des variables de biodiversité..... 175

Figure 75 - Structure des données de physico-chimie des sols du site du Goënidou 195

Figure 76 - AFM du Goënidou : structure des données utilisées pour l'analyse des propriétés physico-chimiques des sols..... 196

Figure 77 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés de drainage des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces..... 197

Figure 78 - spectre taxonomique des graines carbonisées trouvées dans les prélèvements de sol du Goënidou..... 198

Figure 79 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés d'acidité des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces..... 199

Figure 80 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés organiques des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces..... 200

Figure 81 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés du complexe absorbant des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces..... 201

Figure 82 - AFM de Kervédan : structure des données utilisées utilisées pour l'analyse des propriétés physico-chimiques des sols..... 207

Figure 83 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés de drainage des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces 208

Figure 84 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés d'acidité des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces 209

Figure 85 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés organiques des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces 210

Figure 86 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des propriétés du complexe absorbant des sols par rapport aux proximités aux différents types de structures et aux espèces 211

*Figure 87 - Variations du taux de pierrosté (en % sur sol sec) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001)..... 216*

*Figure 88 - Variations de la teneur en charbons (en mg/kg de sol sec) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001) 216*

Figure 89 - Spectre taxonomique des graines carbonisées trouvées dans les prélèvements de sol de Pont-Calleck 217

*Figure 90 - Variations de la teneur en graines crarbonisées (en nb/kg de sol) sec entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001)..... 217*

*Figure 91 - Variations du taux d'humidité (en % sur sol humide) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001) 217*

*Figure 92 - Variations du pH_{eau} entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001) ... 218*

*Figure 93 - Variations du pH_{KCl} entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001) ... 218*

*Figure 94 - Variations du ΔpH entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001) ... 218*

*Figure 95 - Variations du taux de carbone (C en % sur sol sec) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001)..... 219*

*Figure 96 - Variations du taux d'azote (N en % sur sol sec) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001)..... 219*

*Figure 97 - Variations du rapport carbone/azote (C/N) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001)..... 220*

*Figure 98 - Variations des concentrations en phosphore assimilable (en mg de P_2O_5/kg de sol sec) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001) 220*

*Figure 99 - Variations de la CEC (en cmol/kg de sol sec) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001)..... 221*

*Figure 100 - Variation du taux d'occupation de la CEC par l'aluminium (Al/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001)..... 221*

*Figure 101 - Variation du taux d'occupation de la CEC par le calcium (Ca/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001)..... 221*

*Figure 102 - Variation du taux d'occupation de la CEC par le fer (Fe/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001)..... 222*

*Figure 103 - Variation du taux d'occupation de la CEC par le potassium (K/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001)..... 222*

*Figure 104 - Variation du taux d'occupation de la CEC par le magnésium (Mg/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001)..... 222*

*Figure 105 - Variation du taux d'occupation de la CEC par le sodium (Na/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001)..... 222*

*Figure 106 - Variation du taux du taux de saturation en bases de la CEC (S/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001)..... 223*

*Figure 107 - Variation du taux de CEC potentiellement occupée par des protons (H/T en %) entre les horizons AO et A1 et entre relevés et témoins sur le site de pont-Calleck (+ : p<0.10 ; * : p<0.05 ;** : p<0.01 ; *** : p<0.001) 223*

Figure 108 - Exemple de pied de fragon poussant dans un poulailler (Neuville, 19 ; photographie : Sophie LESCURE 2009)..... 226

Figure 109 - AFM du Goënidou : structure des données utilisées pour l'analyse des traits biologiques 233

Figure 110 - Statut des espèces du site du Goënidou (Auto : autochtones ; Dout : statut douteux ; Arch : archéophytes ; Néo : néophytes ; Occas : allochtones occasionnelles ; NR : espèces non renseignées) *234*

Figure 111 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 du statut des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures *234*

Figure 112 - Types biologiques des espèces du site du Goënidou (Phan : méga-méso-microphanérophytes ; nPhan : nanophénérophytes ; Cham : chaméphytes ; Hémi : hémicryptophytes ; Géo0 : géophytes non bulbeuses ; Géo1 : géophytes bulbeuses ; Théro : thérophytes ; NR : espèces non renseignées) *235*

Figure 113 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des types biologiques des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures *236*

Figure 114 - Modes de dispersion des espèces du site du Goënidou (anth : anthropochores ; endO : endoornithochores ; endM : endomammochores ; épiO : épiornithochores ; epiM : épimammochores ; aném : anémochores ; hydr : hydrochores ; ombr : ombrochores ; myr : myrmécochores ; auto : autochores ; baro : barochores ; NR : espèces non renseignées) *237*

Figure 115 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des modes de dispersion des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures *237*

Figure 116 - Modes de multiplication des espèces du site du Goënidou (sex : reproduction sexuée ; part : reproduction partagée(sexuée et végétative) ; veg : veproduction végétative ; NR : espèces non renseignées) *238*

Figure 117 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des modes de multiplication des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures *239*

Figure 118 - Périodes de floraison des espèces du site du Goënidou (NR : espèces non renseignées) *239*

Figure 119 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des dates de floraison des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures *240*

Figure 120 - Capacité de résistance aux métaux lourds des espèces du site du Goënidou (nonM : non métallophytes ; pseudoM : pseudométallophytes ; Mloc : métallophytes locales ; euM : eumétallophytes ; NR : espèces non renseignées) *241*

Figure 121 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des comportements face aux métaux lourds des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures *241*

Figure 122 - AFM du Goënidou : structure des données utilisées pour l'analyse de prédiction de la flore..... 242

Figure 123 - Part des espèces du Goënidou renseignées pour les indices de Grime..... 242

Figure 124 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens de Grime par rapport aux proximités aux différents types de structures..... 243

Figure 125 - Part des espèces du Goënidou renseignées pour les indices d'Ellenberg..... 244

Figure 126 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens d'Ellenberg par rapport aux proximités aux différents types de structures..... 244

Figure 127 - Part des espèces du Goënidou renseignées pour les indices de Gégout 245

Figure 128 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens de Gégout par rapport aux proximités aux différents types de structures 245

Figure 129 - Part des espèces du Goënidou renseignées pour les indices de Hill..... 246

Figure 130 - AFM du Goënidou : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens de Hill par rapport aux proximités aux différents types de structures..... 247

Figure 131 - AFM de Kervédan : structure des données utilisées pour l'analyse des traits biologiques 253

Figure 132 - Statut des espèces du site du Goënidou (Auto : autochtones ; Dout : statut douteux ; Arch : archéophytes ; Néo : néophytes ; Occas : allochtones acosionelles ; NR : espèces non renseignées)..... 253

Figure 133 - Types biologiques des espèces du site de Kervédan (Phan : méga-méso-microphanérophytes ; nPhan : nanophénérophytes ; Cham : chaméphytes ; Hémi : hémicryptophytes ; Géo0 : géophytes non bulbeuses ; Géo1 : géophytes bulbeuses ; Théro : thérophytes ; NR : espèces non renseignées)..... 254

Figure 134 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des types biologiques des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures..... 254

Figure 135 - Modes de dispersion des espèces du site de Kervédan (anth : anthropochores ; endO : endoornithochores ; endM : endomammochores ; épiO : épiornithochores ; epiM : épimammochores ; aném : anémochores ; hydr : hydrochores ; ombr : ombrochores ; myr : myrmécochores ; auto : autochores ; baro : barochores ; NR : espèces non renseignées)..... 255

Figure 136 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des modes de dispersion des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures..... 256

Figure 137 - Modes de multiplication des espèces du site de Kervédan (sex : reproduction sexuée ; part : reproduction partagée(sexuée et végétative) ; veg : veproduction végétative ; NR : espèces non renseignées)..... 256

Figure 138 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des modes de multiplication des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures 257

Figure 139 - Périodes de floraison des espèces du site de Kervédan (NR : espèces non renseignées) 258

Figure 140 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des périodes de floraison des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures 258

Figure 141 - Capacité de résistance aux métaux lourds des espèces du site de Kervédan (nonM : non métallophytes ; pseudoM : pseudométallophytes ; Mloc : métallophytes locales ; euM : eumétallophytes ; NR : espèces non renseignées) 259

Figure 142 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des comportements face aux métaux lourds des espèces par rapport aux proximités aux différents types de structures 260

Figure 143 - AFM du Goënidou : structure des données utilisées pour l'analyse de prédiction de la flore 260

Figure 144 - Part des espèces de Kervédan renseignées pour les indices de Grime 261

Figure 145 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens de Grime par rapport aux proximités aux différents types de structures 261

Figure 146 - Part des espèces de Kervédan renseignées pour les indices d'Ellenberg 262

Figure 147 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens d'Ellenberg par rapport aux proximités aux différents types de structures 262

Figure 148 - Part des espèces de Kervédan renseignées pour les indices de Gégout 263

Figure 149 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens de Gégout par rapport aux proximités aux différents types de structures 264

Figure 150 - Part des espèces de Kervédan renseignées pour les indices de Hill 264

Figure 151 - AFM de Kervédan : représentation sur le plan factoriel 1-2 des indices moyens de Hill par rapport aux proximités aux différents types de structures 265

Figure 152 - Page d'accueil de la base de données de bioindication 276

Figure 153 - Références des données sources de la base de données de bioindication (exemple de Grime) 276

Figure 154 - Formulaire principal de bioindication : zone de saisie (exemple du premier relevé du Goënidou) 277

Figure 155 - Sous-formulaire de saisie des caractéristiques des sites d'étude (exemple du Goënidou) 278

Figure 156 - Formulaire principal de bioindication : zone de résultats (exemple du premier relevé du Goënidou) 279

Figure 157 - Visualisation des données sources associées au relevé étudié (exemple de Grime) *282*

Table des Matières

REMERCIEMENTS **1**

LISTE DES ABBREVIATIONS **5**

CHAPITRE 1 INTRODUCTION **7**

1.1 Vers une archéologie des milieux semi-naturels : la prospection botanique **7**
1.1.1 Inefficacité des méthodes de prospection habituelles en milieux semi-naturels 7
1.1.2 Des sites très bien conservés mais menacés 9

1.2 Une écologie en mutation **9**
1.2.1 De l'écologie à l'étude des écosystèmes 9
1.2.2 Prise en compte de l'homme dans l'étude des écosystèmes 10
1.2.3 Prise en compte de l'histoire dans l'étude des écosystèmes 11

1.3 Constats du DEA : Des résultats prometteurs mais aussi des points d'ombre **12**
1.3.1 Des résultats prometteurs… 12
1.3.2 …mais discutables 12

1.4 Problématiques en suspens **12**

CHAPITRE 2 HISTORIQUE DES RECHERCHES SUR LES ESPECES ARCHEO-INDICATRICES **15**

2.1 Etudes en France **15**
2.1.1 Observations anciennes 15
2.1.1.1 Cas particulier du buis 15
2.1.1.2 Cas des jardins de châteaux 16
2.1.1.3 Cas des anomalies botaniques en milieux semi-naturels 18
2.1.2 Recherches récentes et actuelles 19
2.1.2.1 Equipe de recherches Auvergnate 19
2.1.2.2 Equipe de recherches Limousine 19
2.1.2.3 Equipe de recherches Picarde 22
2.1.2.4 Equipe de recherches Lorraine 23

2.2 Etudes dans le reste de l'Europe **25**
2.2.1 Belgique 25
2.2.2 Allemagne 25
2.2.3 Danemark 26
2.2.4 Estonie 27

2.2.5 Pologne 27
2.2.6 Italie 28
2.2.7 Grèce 29

2.3 Etudes sur le continent Américain 29
2.3.1 Amas coquilliers 29
2.3.2 Sites paléoesquimaux 30
2.3.3 Sites indiens des plaines 31
2.3.4 Sites pueblos 32
2.3.5 Sites Mayas 33

2.4 Etudes sur le continent Africain 34

2.5 Naissance d'une discipline…mais laquelle ? 34
2.5.1 Concept d'éco-archéologie 34
2.5.2 Concepts de phytohistoire et de biohistoire 35
2.5.3 Concept de phytoarchéologie 35
2.5.4 Concept de bioarchéologie 36

Résumé 37

CHAPITRE 3 SYNTHESE DES MODALITES POSSIBLES DE CETTE PRESENCE PREFERENTIELLE : APPROCHE BIBLIOGRAPHIQUE PAR L'EXEMPLE DU FRAGON PETIT HOUX 39

3.1 Plantes introduites 40
3.1.1 Définitions 40
3.1.1.1 Concept d'espèces introduites et d'espèces directement favorisées 40
3.1.1.2 Concept de xénophytes ou plantes allochtones 40
3.1.1.3 Introduction intentionnelle ou accidentelle 41
3.1.1.4 Concept d'archéophytes et de néophytes 41
3.1.1.5 Concept de « stinzenplantzen » ou « plantes castrales » 43
3.1.1.6 Cas du fragon 43
3.1.2 Propriétés des plantes motivant cette introduction (concept d'ethnobotanique) 43
3.1.2.1 Propriétés mécaniques 44
3.1.2.1.1 Principe 44
3.1.2.1.2 Cas du fragon 44
3.1.2.2 Propriétés calorifiques 45
3.1.2.2.1 Principe 45
3.1.2.2.2 Cas du fragon 45
3.1.2.3 Propriétés alimentaires 46
3.1.2.3.1 Principe 46
3.1.2.3.2 Cas du fragon 46

3.1.2.4 Propriétés ornementales 46
3.1.2.4.1 Principe 46
3.1.2.4.2 Cas du fragon 47
3.1.2.5 Propriétés médicinales 47
3.1.2.5.1 Principe 47
3.1.2.5.2 Cas du fragon 47
3.1.2.6 Propriétés symboliques 48
3.1.2.6.1 Principe 48
3.1.2.6.2 Cas du fragon 48

3.2 Plantes favorisées 50
3.2.1 Sélection humaine 50
3.2.1.1 Principe 50
3.2.1.2 Cas du fragon 50
3.2.2 Vecteurs de dissémination liés aux occupations humaines (concept d'espèces commensales de l'homme) 51
3.2.2.1 Principe 51
3.2.2.2 Cas du fragon 51
3.2.3 Favorisation par la modification de l'environnement 52
3.2.3.1 Résistance des espèces à la modification de l'environnement (concept d'écologie des perturbations) 52
3.2.3.1.1 Principe de perturbations 52
3.2.3.1.2 Stratégies d'adaptation aux perturbations 52
3.2.3.1.3 Cas du fragon 54
3.2.3.2 Adaptation des espèces au nouvel environnement 55
3.2.3.2.1 Concept d'écologie d'une espèce 55
3.2.3.2.2 Concept de niche écologique potentielle 56
3.2.3.2.3 Influence de la compétition interspécifique 56
3.2.3.2.4 Concept de niche écologique réalisée 56
3.2.3.2.5 Concept de partage temporel de niche écologique 57
3.2.3.2.6 Valeurs indicatrices 57
- Valeurs indicatrices qualitatives 57
- Valeurs indicatrices quantitatives 57

3.2.3.2.7 Cas du fragon 59

3.3 Plantes reflétant un stade dynamique différent 60
3.3.1 Concept de successions végétales et de climax 60
3.3.2 Vitesse de colonisation des espèces 60
3.3.3 Enrichissement du milieu au cours des successions 61
3.3.4 Saut dans les successions en fonction de l'état initial 61
3.3.5 Cas du fragon 61

Résumé ... **62**

CHAPITRE 4 CHOIX DES SITES D'ETUDE ... **65**

4.1 Modalités de choix ... **65**
4.1.1 Contraintes archéologiques ... 65
4.1.1.1 Site connu ... 65
4.1.1.2 Site susceptible d'avoir modifié la végétation ... 65
4.1.1.2.1 Sites « majeurs » ... 65
4.1.1.2.2 Sites peu enfouis ... 65
4.1.1.2.3 Sites « récents » ... 65
4.1.1.3 Etude prévue ... 66
4.1.1.4 Milieu naturel approprié ... 66
4.1.2 Contraintes botaniques ... 66
4.1.2.1 Concept d'aire minimale ... 66
4.1.2.2 Facteur de variation de l'aire minimale ... 67
4.1.2.3 Choix des milieux en fonction de l'échelle d'étude ... 67

4.2 Problèmes rencontrés ... **68**
4.2.1 Délais d'études inadaptés ... 68
4.2.2 Contraintes légales ... 68
4.2.3 Milieu perturbé ... 69
4.2.3.1 par les usages actuels ... 69
4.2.3.2 par les sondages archéologiques ... 69
4.2.4 Absence de témoins ... 70
4.2.5 Milieu trop particulier ... 70
4.2.6 Structures mal localisées ... 70

4.3 Réponses aux problèmes rencontrés ... **70**
4.3.1 Organisation de campagnes de fouilles ... 70
4.3.2 Etudes préalables des sites ... 71
4.3.2.1 Analyse micro-topographique ... 71
4.3.2.2 Prospection géophysique ... 71

Résumé ... **71**

CHAPITRE 5 SITES D'ETUDE CHOISIS ... **73**

5.1 Le Goënidou (Berrien, Finistère) ... **73**
5.1.1 Présentation ... 73
5.1.1.1 Localisation ... 73
5.1.1.2 Contexte archéologique ... 73
5.1.1.3 Contexte environnemental ... 77

5.1.2 Choix de la zone d'étude 78
5.1.2.1 Choix en fonction des structures 78
5.1.2.2 Choix en fonction des usages actuels 79

5.2 La Montagne (Visseiche, Ille-et-Vilaine) 80
5.2.1 Présentation 80
5.2.1.1 Localisation 80
5.2.1.2 Contexte archéologique 80
5.2.1.3 Contexte environnemental 81
5.2.2 Choix de la zone d'étude 82

5.3 Pointe de Kervédan (Groix, Morbihan) 84
5.3.1 Présentation 84
5.3.1.1 Localisation 84
5.3.1.2 Contexte archéologique 84
5.3.1.3 Contexte environnemental 86
5.3.2 Choix des zones d'étude 88
5.3.2.1 Mise en place d'un carroyage 88
5.3.2.2 Analyse topographique de l'ensemble de l'éperon 89
5.3.2.3 Recalage du plan établi lors des sondages de 1939 90
5.3.2.4 Cartographie géophysique 91
- Prospection électromagnétique 92
- Prospection magnétique 92
- Prospection électrique 94

5.3.2.5 Zones d'étude choisies 96

5.4 Forêt de Pont-Calleck (Berné, Morbihan) 97
5.4.1 Présentation 97
5.4.1.1 Localisation 97
5.4.1.2 Contexte archéologique 98
5.4.1.3 Contexte environnemental 99
5.4.2 Choix des zones d'étude 101
5.4.2.1 Prospection des pieds de fragon 101
5.4.2.2 Choix des sondages réalisables 101
5.4.2.3 Localisation des sondages 102

Résumé 104

CHAPITRE 6 METHODOLOGIE 107

6.1 Etude de la végétation 107
6.1.1 Nomenclature utilisée 107
6.1.2 Etude au niveau d'une espèce végétale (site de Pont-Calleck) 107

6.1.2.1 Implantation des sondages 107
6.1.2.2 Orthophotographie 107
6.1.2.3 Photo-interprétation 108
6.1.3 Etude de la végétation ligneuse (site de la Montagne) 108
6.1.3.1 Cartographie ponctuelle des pieds 108
6.1.3.2 Spatialisation des données 108
6.1.4 Etude de la flore vasculaire 108
6.1.4.1 Implantation d'un carroyage 109
6.1.4.2 Relevés de végétation 110
6.1.4.3 Relevés orthophotographiques 111
6.1.4.4 Constitution de la base de données des relevés 112
- Structure de la base de données 112
- Construction de la table relevés-espèces 112
- Caractérisation des relevés en termes de diversité 113
- Spatialisation de la base de données 114

6.2 Etude de l'écologie des espèces 115
6.2.1 Caractéristiques écologiques des espèces utilisées 115
- Statut des espèces 115
- Types biologiques 116
- Modes de dispersion 116
- Stratégies reproductices 116
- Périodes de floraison 116
- Capacité de résistance aux métaux lourds 116

6.2.2 Indices de bioindication utilisés 117
- Indices de Grime 117
- Indices d'Ellenberg 118
- Indices de Gégout 118
- Indices de Hill 119

6.2.3 Liaisons entre tables 119
6.2.4 Calcul des indices synthétiques de bioindication 120
6.2.4.1 Indices de caractérisation de la flore (descriptions) 120
6.2.4.2 Indices de caractérisation du milieu (prédictions) 120

6.3 Etude des sols 121
6.3.1 Prélèvements 121
6.3.1.1 Sites échantillonnés 121
6.3.1.2 Plans d'échantillonnage 122
6.3.2 Analyses des prélèvements de sols 122
6.3.2.1 Choix des analyses 122

6.3.2.1.1 Propriétés-physico-chimiques des sols susceptibles d'être modifiées par les occupations anciennes 122
6.3.2.1.2 Propriétés-physico-chimiques des sols susceptibles d'influer sur la végétation 124
6.3.2.1.3 Analyses choisies 125
6.3.2.2 Préparation des échantillons (norme ISO 11464) 126
6.3.2.3 pH (norme ISO 10390) 126
6.3.2.4 C/N (normes ISO 10694 et ISO 13878) 127
- Pesée 127
- Mesure 127

6.3.2.5 Phosphore assimilable au pH du sol : méthode Dyer (norme NF X31-160) 127
- Principe 127
- Extraction 127
- Réalisation des solutions étalons 128
- Préparation du réactif de coloration 128
- Réaction colorimétrique 128
- Mesure 129

6.3.2.6 Capacité d'échange cationique (CEC) et Cations majeurs assimilables au pH du sol : méthode au chlorure de cobaltihexamine (norme NF X31-130) 129
6.3.2.6.1 Extraction 129
- Principe 129
- Méthode 129

6.3.2.6.2 CEC 130
- Principe 130
- Méthode 131

6.3.2.6.3 Cations majeurs 131
- Principe 131
- Méthode 131

6.3.2.7 Constitution de la base de données sol 132
6.3.2.8 Spatialisation de la base de données sol 133

6.4 Etude des sites archéologiques 134
6.4.1 Site du Goënidou 134
6.4.1.1 Extraction des anomalies 134
6.4.1.2 Interprétation 134
6.4.2 Site de La Montagne 136
6.4.2.1 Calage des données de prospections aériennes 136
6.4.2.2 Calage des données de fouilles et numérisation 136
6.4.3 Site de Kervédan 137
6.4.3.1 Fouille des relevés 137
6.4.3.2 Relevés orthophotographiques 138

6.4.4 Site de Pont-Calleck 138
6.4.4.1 Fouille des relevés 138
6.4.4.2 Relevés orthophotographiques 138

6.5 Attribution de variables d'environnement archéologique 139
6.5.1 Aux relevés 139
6.5.2 Aux prélèvements de sol 139

6.6 Analyse statistique des données 140
6.6.1 Comparaison de la distribution observée de pieds d'une espèce à un modèle spatial aléatoire 140
6.6.2 Comparaisons de valeurs physico-chimiques moyennes par permutations entre relevés et témoins appariés 140
6.6.3 Croisements des différents types de données en même temps (AFM) 141

Conclusion 142

CHAPITRE 7 RELATION SPATIALE ENTRE LES STRUCTURES ARCHEOLOGIQUES ET LES ESPECES VEGETALES ACTUELLES 143

7.1 Réponse de la strate arbustive (site de La Montagne) 143
7.1.1 Résultats 143
7.1.1.1 Analyse cartographique 143
7.1.1.2 Analyses statistiques spatiales 144
7.1.2 Discussion 146
7.1.2.1 Observation de différences de flore sur les structures 146
7.1.2.2 Nécessité de prise en compte de l'autocorrélation spatiale 147

7.2 Réponse de l'ensemble de la flore vasculaire à l'échelle du site (site du Goënidou) 149
7.2.1 Résultats 149
7.2.1.1 Synthèse des variables biométriques 149
7.2.1.2 Analyses séparées 150
7.2.1.3 Signification des axes de l'AFM 151
7.2.1.4 Interprétation des axes de l'AFM en termes de typologie des structures 153
7.2.1.5 Structuration spatiale des axes de l'AFM 154
7.2.1.6 Interprétation des axes de l'AFM en termes de composition floristique 155
7.2.1.7 Comportement de la fougère aigle vis à vis des structures 157
7.2.1.8 Comportement de la biodiversité vis à vis des structures 157
7.2.2 Discussion 158
7.2.2.1 Comportement général de la flore vis à vis des structures 158
- Présence d'un lien fort entre flore et structures archéologiques 158
- Différences notables de la flore en fonction de la présence de structures 158

- Différences notables de la flore entre aires d'activité 159
- Pas de différences notables de la flore entre structures différentes au sein d'une même aire d'activité 159

7.2.2.2 Comportement de la fougère aigle vis à vis des structures 159

7.2.2.3 Comportement des espèces dominantes de la strate herbacée vis à vis des structures 160

7.2.2.4 Comportement des espèces accompagnatrices de la strate herbacée vis à vis des structures 160

- Présence d'un gradient d'activité diffuse/activité agraire/activité domestique 160
- Espèces caractéristiques des zones d'activité diffuse 161
- Espèces caractéristiques des zones d'activités diffuse et agraire 161
- Espèces caractéristiques des zones d'activité agraire 161
- Espèces caractéristiques des zones d'activités agraire et domestique 161
- Espèces caractéristiques des zones d'activité domestique 161
- Augmentation de la biodiversité au niveau des zones agraires 162

7.3 Réponse de l'ensemble de la flore vasculaire à l'échelle des structures (site de Kervédan) 162

7.3.1 Résultats 162

7.3.1.1 Résultats des sondages 162

- Sondage I (fig. 59) 162
- Sondage II (fig. 60) 163
- Sondage III (fig. 61) 163
- Sondage IV (fig. 62) 163
- Sondage V (fig. 63) 164
- Remarques générales 164

7.3.1.2 Analyse rapide de la végétation du système de rempart 164

7.3.1.3 Analyse fine de *Daucus carotta* au niveau du sondage I 166

7.3.1.4 Analyse de la végétation sur l'ensemble des sondages 167

7.3.1.4.1 Analyses séparées 168

7.3.1.4.2 Signification des axes de l'AFM 169

7.3.1.4.3 Interprétation des axes de l'AFM en termes de typologie des structures 171

7.3.1.4.4 Structuration spatiale des axes de l'AFM 172

7.3.1.4.5 Interprétation des axes de l'AFM en termes de composition floristique 174

7.3.1.4.6 Comportement de la biodiversité vis à vis des structures 176

7.3.2 Discussion 176

7.3.2.1 Analyse du système de remparts 176

7.3.2.2 Analyse de *Daucus carota* 176

7.3.2.3 Analyse de l'ensemble des relevés 177

- Présence d'un lien fort entre flore et structures archéologiques 177

- Différences notables de la flore en fonction de la présence de structures..... 177
- Différences notables de la flore suivant un gradient est/ouest 177
- Différences peu marquées de la flore en fonction de la typologie des structures 178
- Flore caractéristique des structures 178
- Flore caractéristique des zones sans structures 178
- Flore caractéristique de l'ouest de l'éperon 179
- Flore caractéristique de l'est de l'éperon 179

7.4 Vérification du caractère « archéo-indicateur » pressenti d'une espèce par des fouilles systématiques (site de Pont-Calleck) 179

7.4.1 Résultats (annexe 10) 179
- Sondage I (annexe 10a) 179
- Sondage II (annexe 10b) 180
- Sondage III (annexe 10c) 181
- Sondage IV (annexe 10d) 181
- Sondage V (annexe 10e) 182
- Sondage VI (annexe 10f) 182
- Sondage VII (annexe 10g) 183

7.4.2 Discussion 183

7.4.2.1 Discussion individuelle pour chaque sondage 183
- Sondage I et II 183
- Sondage III 185
- Sondage IV 185
- Sondage V 186
- Sondage VI 187
- Sondage VII 188

7.4.2.2 Discussion générale sur l'ensemble des sondages 189

7.5 Discussion générale 190

7.5.1 De l'observation de corrélations à la notion d'impact 190

7.5.2 Impact différentiel des structures sur la flore 191

7.5.3 Impact indirect des structures sur la flore : interactions entre espèces végétales. 192

7.5.4 Validité des résultats aux différentes échelles 192

7.5.5 Validité des résultats pour les différents milieux végétaux 193

Conclusion 194

CHAPITRE 8 ANALYSE DE L'IMPACT DES OCCUPATIONS ARCHEOLOGIQUES SUR LA FLORE A TRAVERS LA NATURE PHYSICO-CHIMIQUE DES SOLS 195

8.1 Variation latérale à l'échelle du site (Site du Goënidou) 195
8.1.1 Résultats 195
8.1.1.1 Interpolation des variables de physico-chimie des sols 195
8.1.1.2 Interprétation de l'AFM en termes de drainage 196
8.1.1.3 Interprétation de l'AFM en termes d'acidité 198
8.1.1.4 Interprétation de l'AFM en termes de matière organique et de phosphore 199
8.1.1.5 Interprétation de l'AFM en termes de complexe absorbant 200
8.1.2 Discussion 202
8.1.2.1 Doutes sur la fiabilité de certaines variables 202
8.1.2.2 Impact flagrant des bâtiments sur la physico-chimie des sols 202
8.1.2.3 Présence d'un gradient physico-chimique entre aires d'activité 203
8.1.2.4 Rôle de la physico-chimie des sols dans l'impact des structures sur la flore 204
8.1.2.5 Causes possibles des modifications de physico-chimie des sols au niveau des structures 205
- Impact direct des occupations sur le milieu 205
- Impact indirect par modification de la flore 206

8.2 Variation latérale à l'échelle des structures (site de Kervédan) 206
8.2.1 Résultats 206
8.2.1.1 Ajout de la physico-chimie comme groupe supplémentaire de l'AFM 207
8.2.1.2 Drainage 207
8.2.1.3 Acidité 209
8.2.1.4 Matière organique et phosphore 209
8.2.1.5 Complexe absorbant 210
8.2.2 Discussion 212
8.2.2.1 Nette modification de drainage au niveau des structures en creux 212
8.2.2.2 Présence d'un gradient physico-chimique est/ouest marqué 212
8.2.2.3 Adaptation de la flore aux différentes conditions 214
- Vis-à-vis de la présence de structure 214
- Vis-à-vis du gradient de salinité 215

8.3 Variation verticale (Site de Pont-Calleck) 215
8.3.1 Résultats 215
- Drainage 216
- Acidité 218
- Matière organique et phosphore 219
- Complexe absorbant 220

8.3.2 Discussion 223
8.3.2.1 Différences de physico-chimie entre horizons de sol 223
- Cycles biogéochimiques naturels 223
- Cycles biogéochimiques perturbés 224

8.3.2.2 Différences de physico-chimie des sols sous fragon 225
- Apports à l'écologie du fragon 225
- Possible modification du milieu par le fragon 227

8.4 Discussion générale 227
8.4.1 Phénomène de sensibilité à la profondeur de prélèvement 227
8.4.2 Impact des occupations archéologiques sur le fonctionnement des sols 228
8.4.3 Impact différentiel en fonction des sites d'études et de la typologie 228
8.4.4 Impact fonctionnel *versus* impact structurel 229
8.4.5 Impact des modifications du sol sur la flore 229
8.4.6 Impact possible de la flore sur les sols 230

Conclusion 230

CHAPITRE 9 ANALYSE DE L'IMPACT DES OCCUPATIONS ARCHEOLOGIQUES SUR LA FLORE A TRAVERS L'ECOLOGIE DES ESPECES VEGETALES 233

9.1 Goënidou 233
9.1.1 Résultats 233
9.1.1.1 Caractérisation de la flore (descriptions) 233
- Statut 234
- Types biologiques 235
- Modes de dispersion 236
- Mode de multiplication 238
- Période de floraison 239
- Résistance aux métaux lourds 240

9.1.1.2 Caractérisation du milieu (prédictions) 242
- Grime 242
- Ellenberg 243
- Gégout 245
- Hill 246

9.1.2 Discussion 247
9.1.2.1 Pas d'introduction d'espèce *a priori* 247
9.1.2.2 Présence d'espèces favorisées par les activités humaines 248
- Pas d'espèce reflétant une sélection humaine 248
- Pas d'espèces apportées par des animaux liés aux activités humaines 248
- Présence d'espèces liées aux perturbations humaines 248
- Certaines modifications du milieu sont à l'origine des différences de flore 249

9.1.2.3 La flore reflète un stade dynamique différent 250
- Observation d'une fermeture du milieu sur les bâtiments 250

- Observation d'espèces végétales à dispersion rapide sur les bâtiments 250
- Présence d'un saut de successions végétales dû à l'enrichissement du sol 251

9.1.2.4 Influence nette de la compétition interspécifique 251

- Présence d'espèces non compétitives au niveau des structures agraires 251
- Etalement de la floraison des espèces sur structures 252

9.2 Groix 252

9.2.1 Résultats 252

9.2.1.1 Caractérisation de la flore (descriptions) 252

- Statut 253
- Types biologiques 254
- Modes de dispersion 255
- Mode de multiplication 256
- Période de floraison 257
- Résistance aux métaux lourds 259

9.2.1.2 Caractérisation du milieu (prédictions) 260

- Grime 261
- Ellenberg 262
- Gégout 263
- Hill 264

9.2.2 Discussion 265

9.2.2.1 Pas d'espèces introduites 265

9.2.2.2 Espèces favorisées 266

- Pas d'espèce reflétant une sélection humaine 266
- Pas d'espèces apportées par des animaux liés aux activités humaines 266
- Les modifications du milieu sur structures participent aux différences de flore 266

9.2.2.3 La flore reflète un stade dynamique différent 267

- Observation d'une fermeture du milieu sur les structures 267
- Fermeture du milieu sur les structures en creux due à une meilleure ressource en eau 267
- Auto-entretien et accentuation des différences de stades dynamiques 268

9.3 Discussion générale 268

9.3.1 Fiabilité des indices 269

- Fiabilité des indices de description 269
- Fiabilité des indices de prédiction 269
- Problème des sous-espèces et écotypes 269
- Problème des corrélations entre indices 270

9.3.2 Réponse par rapport aux modalités envisagées 270

9.3.2.1 Absence d'introduction d'espèces 271
9.3.2.2 Présence d'une flore favorisée par les modifications du milieu 271
9.3.2.3 Fermeture du milieu au dessus des occupations archéologiques 271
9.3.3 Indices utilisables en prospection botanique 272

Conclusion 272

CHAPITRE 10 PERSPECTIVES : UN NOUVEL OUTIL DE BIOINDICATION AU SERVICE DE LA PROSPECTION ET DE L'INTERPRETATION ARCHEOLOGIQUE 275

10.1 Présentation du formulaire de bioindication de terrain 275
10.1.1 Zone de saisie 276
10.1.1.1 Saisie des caractéristiques générales du relevé 277
10.1.1.2 Saisie des relevés botaniques 278
10.1.2 Zone de résultats 278
10.1.2.1 Indices de Biodiversité 279
10.1.2.2 Indices de Description 279
10.1.2.3 Indices de Prédiction 280

10.2 Limites d'utilisation 281
- Nombre d'espèces du relevé 281
- Nombre d'espèces intégrées dans les calculs 282
- Erreurs de détermination 282
- Variabilité latérale de faciès *versus* valeur seuil 283
- Risque d'origine autre qu'archéologique 283
- Nécessité d'une lecture préalable de la végétation 283
- Nécessité d'une bonne connaissance de la flore locale 284

10.3 Perspectives 284
10.3.1 Un outil au service de la prospection archéologique et de l'interprétation des sites archéologiques 284
10.3.2 Un outil au service des paléobotanistes 284
10.3.3 Un outil au service des écologues 285
10.3.4 Un outil qui peut et doit évoluer 285

Conclusion 285

CHAPITRE 11 CONCLUSION GENERALE 287

11.1 Rappel du cadre de l'étude et de ses objectifs 287
11.1.1 Une archéologie et une écologie en demande de phytoarchéologie 287
11.1.2 Des résultats de DEA prometteurs 287

11.1.3 Des questions en suspens 287

11.2 Moyens mis en œuvre 288
11.2.1 Analyse bibliographique 288
11.2.2 Sélection des sites 288
11.2.3 Etude des sites retenus 288

11.3 Principaux résultats 289
11.3.1 Définition d'une nouvelle discipline : la phytoarchéologie 289
11.3.2 Existence de causes multiples pouvant expliquer les anomalies phytoarchéologiques 289
11.3.3 Impact flagrant des occupations archéologiques sur la flore 289
11.3.4 Impact récurrent des occupations archéologiques sur les sols 290
11.3.5 Différences de flore observées dues à des sols plus favorables sur les occupations, entraînant une fermeture du milieu 290

11.4 Perspectives 291
11.4.1 Confirmer le caractère métallophytique de la flore des structures 291
11.4.2 Mettre en application la prospection botanique sur le terrain 291
11.4.3 Croiser les bases de données archéologiques et botaniques existantes 292
11.4.4 Elargir l'étude à l'ensemble des êtres vivants 293

BIBLIOGRAPHIE 295

GLOSSAIRE DES TERMES ECOLOGIQUES 323

TABLE DES ILLUSTRATIONS 327

Liste des tableaux 327

Liste des figures 327

TABLE DES MATIERES 337

VU :

Le Directeur de Thèse
(Nom et Prénom)

VU :

Le Responsable de l'école Doctorale

VU pour autorisation de soutenance

Rennes, le

Le Président de l'Université de Rennes 1

Guy CATHELINEAU

VU après soutenance pour autorisation de publication :

Le président de Jury,
(Nom et Prénom)

Résumé:

Depuis longtemps, partout dans le Monde, la présence d'une flore particulière a pu être observée en lien avec les occupations archéologiques. Cela intéresse les archéologues qui y voient une possible utilité en prospection, et les écologues qui intègrent de plus en plus l'homme et le passé dans la compréhension des écosystèmes actuels.

L'étude de quatre sites archéologiques en milieux semi-naturels permet d'évaluer ce lien entre sites et végétation dans l'Ouest de la France. Sur chacun, l'impact des structures sur la flore est flagrant. Les sols de trois de ces sites ont été analysés : leurs propriétés physiques et chimiques sont modifiées par les occupations anciennes. L'analyse écologique de la flore de deux des sites apporte des réponses. Les espèces végétales particulières observées sur les sites n'ont pas été apportées par l'homme. Elles sont le reflet de cette modification durable des sols. Cela s'accompagne d'une fermeture précoce du milieu, due à une meilleure disponibilité des ressources minérales ou hydriques sur les occupations anciennes.

Afin de permettre l'application de ces travaux à la prospection archéologique, un programme informatique de bioindication a été développé. Un nom est proposé pour cette nouvelle discipline : la phytoarchéologie.

Mots clés:

Massif Armoricain (France) ; Archéologie du paysage ; Ecologie du paysage ; Prospection archéologique ; Plantes indicatrices ; Chimie des sols

---

Abstract:

Since a long time throughout the World, presence of a particular flora has been observed on archaeological occupations. Archaeologists are interested in this relationship for surveying purposes. These long term man impacts are more and more intergrated in present ecological studies.

Study of four archaeological sites in semi-natural areas allows to evaluate the link between sites and vegetation in North-Western France. Impact of structures on flora is obvious on each site. Soils of three of them are analysed : their physical and chemical properties are modified by ancient occupations. Ecological analysis of two sites flora provides answers. Plant species observed on specific sites were not introduced by man. They reflect this sustainable change of the soils. There is an early closure of the environment related to a better availability of mineral and water resources on old occupations.

Bioindication software is developed to apply our approach to archaeological surveys. This discipline called "phytoarchaeology" is redefined.

Key-words:

Armorican Massif (France) ; Landscape archaeology ; Landscape ecology ; Archaeological surveying ; Plant indicators ; Soil chemistry