PCR Brécilien « Etude interdisciplinaire d'une forêt mythique »

Bilan d'activité 2010

DRAC-SRA
23 NOV. 2010
COURRIER ARRIVEE

Jean-Charles Oillic
(dir.)

Avec la collaboration de :
Caroline Beigle
Nicolas Girault
Cécile Le Carlier
Elise Merdy
Jean-Bernard Vivet

2603

Crédits photographiques :
Bas-fourneau (N. Girault)
Relevé sonar de l'étang de Paimpont (A. Baltzer)
Diagramme pollinique du Pas de la Chèvre (J.-C. Oillic)
Archive de l'abbaye de Paimpont (A. Reinbold)

Sommaire

Introduction 4
1. Problématique générale 4
2. Choix de la zone d'étude 4
Contexte de l'étude. 7
1. Cadre géographique. 7
2. Cadre géologique. 7
3. Cadre climatique. 10
4. Cadre pédologique. 11
La paléométallurgie 13
1. Prospection 13
2. Fouilles archéologiques 14
2.1 Ateliers de La Boissière 14
2.2 Atelier de Moustache 14
2.3 Fouille du site de Péronnette 15
3. Analyses C14. 15
3.1 Sites protohistoriques 15
3.2 Production de fer médiévale 16
4. Analyses métallurgiques (C. Le Carlier) 18
4.1 Présentation de la banque de données 18
4.2 Une signature générale du secteur de Paimpont ? 19
4.3 A Paimpont, une signature possible des différents types de scories ? 20
4.4 - A Paimpont, une influence du type de minerai sur la composition des scories ? 23
Les sites d'habitat et autres occupations 25
Patrimoine religieux 28
1. Inventaire 28
2. Etude du bâti : la chapelle Saint-Etienne (Mémoire E. Merdy) 29
2.1 Objet d'étude 30
2.2 Méthodes 32
2.3 4. Résultats 34
2.4 Conclusion 43
Paléoenvironnement 44
1. Palynologie 44
2. Isotopie (Mémoire Master 2 C. Beigle) 52
2.1 Introduction 53
2.2 Zone d'étude 54
2.3 Matériel et méthodes 54
2.4 Résultats 60
2.5 Discussion 64
2.6 $\delta^{13}C$ de la tourbe 66
2.7 Conclusions et perspectives 68
3. Anthracologie 70
Publication et diffusion de la culture scientifiques 72
Conclusion et perspectives 75
Références bibliographiques. 77
1. Paléométallurgie 77
2. Les sites d'habitat et autres occupations 77
3. Patrimoine religieux 77
4. Paléoenvironnement 78
Table des illustrations 83

Introduction

1. Problématique générale

Au cours de ce programme de recherche, il s'agit de comprendre l'évolution du territoire de l'ancienne forêt de Brécilien tant sur le plan des implantations humaines que du point de vue environnemental. Afin de répondre à cet objectif, le projet se décompose en quatre axes. Les deux premiers intitulés « populations anciennes» et « populations religieuses chrétiennes» concernent les implantations humaines passées. La création de ces deux axes proches s'explique par la richesse apparente de la zone PCR en édifices religieux (cf. supra). Ensuite, le nombre important de sites paléométallurgiques déjà inventoriés dans la moitié occidentale du massif suggère que cette activité a joué un rôle important dans l'occupation de la forêt de Brécilien, aussi a-t-il été décidé de créer un troisième axe de recherche autour de cette thématique métallurgique. Enfin, pour mieux comprendre l'histoire de ce territoire, il est apparu nécessaire d'intégrer une partie paléoenvironnementale à ce programme de recherche.

Après avoir développé les problématiques propres à chacun de ces quatre volets, ce programme cherchera à comprendre les liens qui ont pu exister entre eux. Ainsi, nous nous interrogerons sur l'influence qu'ont pu avoir les populations anciennes et monastiques sur la végétation locale, lors de leurs installations et développements, notamment au travers de questions concernant l'importance de leur activité de défrichement. Nous nous intéresserons aussi aux questions reliant monachisme et métallurgie comme celle de la possible présence de forges monacales au XIII^{ème} siècle (Duval 1998) ou celle de l'origine du fer utilisé dans les bâtiments religieux. Il s'agira également de comprendre le mode d'exploitation des ressources naturelles pour les besoins de la métallurgie et des populations (construction, chauffage, élevage…), mais aussi de voir comment cet approvisionnement a pu modeler le paysage (création de carrières et de minières, surexploitation…)

2. Choix de la zone d'étude

Cette étude devant s'inscrire dans un espace cohérent historiquement, il est apparu nécessaire de s'intéresser aux sources écrites. Deux ont semblé particulièrement intéressants pour esquisser les limites de ce qu'a pu être la forêt de Brécilien à la fin de la période médiévale.

La première de ces sources s'intitule « la coutume de Brécilien » et date de 1467. Ce texte a été publié par Arthur de La Borderie comme « Eclaircissements » à la suite de ses Prolégomènes du Cartulaire de l'Abbaye Saint-Sauveur de Redon en 1863. Puis il a été retranscrit et réédité par A Puton en 1879. Il s'agit d'un texte qui peut être décomposé en deux parties. Dans la première partie, rédigée 1467, mais reprenant en partie un texte plus ancien, l'auteur décrit, au travers de 72 articles, l'ensemble des droits et devoirs qui régissent l'utilisation de l'espace forestier de Brécilien par les habitants situés à proximité de la forêt, qu'ils soient seigneurs laïcs, religieux ou simples habitants. Quatre des ces articles forment une sous partie intitulée « Des ornements de la forêt et de ses merveilles. », dans laquelle l'auteur décrit la forêt et attribue diverses vertus à certains lieux s'y trouvant.

La seconde partie de ce texte a été rédigée le 30 août 1467 sur la volonté de Guy XIV de Laval. Elle se compose de 19 articles qui visent à réduire les abus qui peuvent avoir lieu en forêt tant de la part des usagers qui viendraient à frauder que de celle des représentants seigneuriaux qui profiteraient de leur autorité pour s'enrichir.

La seconde source à notre disposition pour cette période a été publiée par le Marquis de l'Estourbeillon dans le Bulletin de la Société Polymathique du Morbihan en 1893 sous le titre « Revenus de la forêt de Brocéliande ». Dans cet article, l'auteur retranscrit en totalité les recettes et dépenses détaillées, générées par la Forêt de Brécilien et la châtellenie de Plélan pour l'année 1419. Il est également fait mention du bilan financier de ce territoire pour les années 1420, 1421 et de 1557 à 1560.

A la lecture de ces deux sources, il est possible d'identifier plusieurs usagers de la forêt de Brécilien. Comme pour chacune de ces personnes, il est généralement fait mention de leur lieu de

résidence, il est possible de replacer géographiquement ces derniers afin d'obtenir le fond de carte présenté en figure 1.

L'examen de ce document permet de constater que les personnes qui pratiquaient le territoire de la forêt de Brécilien au cours des XV^{ème} et XVI^{ème} siècles résidaient dans un espace qui courait d'est en ouest de Campénéac à Montfort-sur-Meu et du nord au sud, de Concoret ou Saint-Malon-sur-Mel jusqu'à Saint Malo-de-Beignon, ce qui représente un territoire d'environ trente kilomètres de long par une dizaine de large. Or, lorsqu'on se reporte à la partie de « la coutume de Brécilien » qui décrit la forêt et ses ornements, on peut y trouver les dimensions suivantes concernant la forêt. Elle mesurait, selon l'auteur, «7 lieues de long sur 2 et même plus de large». Si l'on tient compte du fait qu'à cette période une lieue bretonne équivalait à 4,677km on obtient alors des dimensions équivalentes à 32,7km par 9,3 et plus., ce qui correspond approximativement à l'espace défini plus haut par l'analyse de la carte présentée en figure 1.

Figure 1 : Carte de répartition des lieux de résidences des usagers de la forêt de Brécilien mentionnés dans les archives du XV^{ème} siècle.

Cette brève analyse de sources écrites concernant la forêt de Brécilien, nous permet de définir comme cadre d'étude pour ce PCR, un espace qui, au moins à la fin de la période médiévale, présentait une cohérence tant géographique que politique, puisqu'il relevait de la seule autorité du seigneur du Laval. Ce territoire, qui formera la zone d'étude de notre programme de recherche, couvrira donc l'espace représenté sur la figure 1. Cette zone, bien que majoritairement située sur le département d'Ille-et-Vilaine, couvre également une partie de celui du Morbihan. L'ensemble des communes qui constitueront cet espace est les suivantes. Pour le département du Morbihan, on trouve par ordre alphabétique : Augan, Beignon, Campénéac, Concoret, Guer, Mauron, Néant-sur-Yvel, Porcaro, Saint-Léry, Saint-Malo-de-Beignon et Tréhorenteuc. Tandis que celles situées en Ille-et-Vilaine seront : Bédée, Bléruais, Breteil, Cintré, Gaël, Iffendic, La Nouaye, Le Verger, Maxent, Monterfil, Montfort-sur-Meu, Paimpont, Plélan-le-Grand, Saint-Gonlay, Saint-Maugan, Saint-Malon-sur-Mel, Saint-Péran, Talensac et Treffendel (Figure 2).

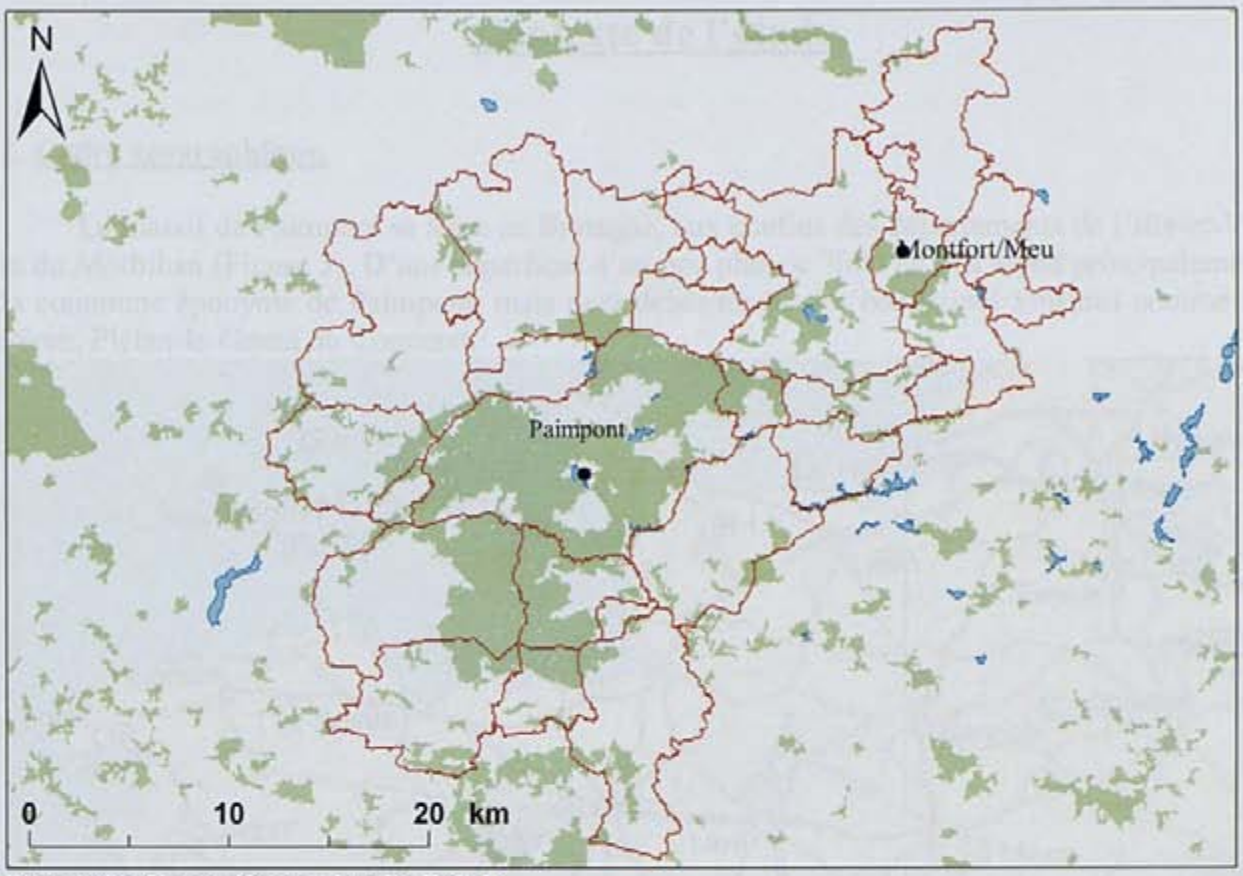


Figure 2 : Zone d'emprise du P.C.R

Contexte de l'étude.

1. Cadre géographique.

Le massif de Paimpont se situe en Bretagne, aux confins des départements de l'Ille-et-Vilaine et du Morbihan (Figure 3). D'une superficie d'un peu plus de 7000 ha, il s'étend principalement sur la commune éponyme de Paimpont, mais peut déborder sur les communes voisines comme Saint-Péran, Plélan-le-Grand ou Concoret.

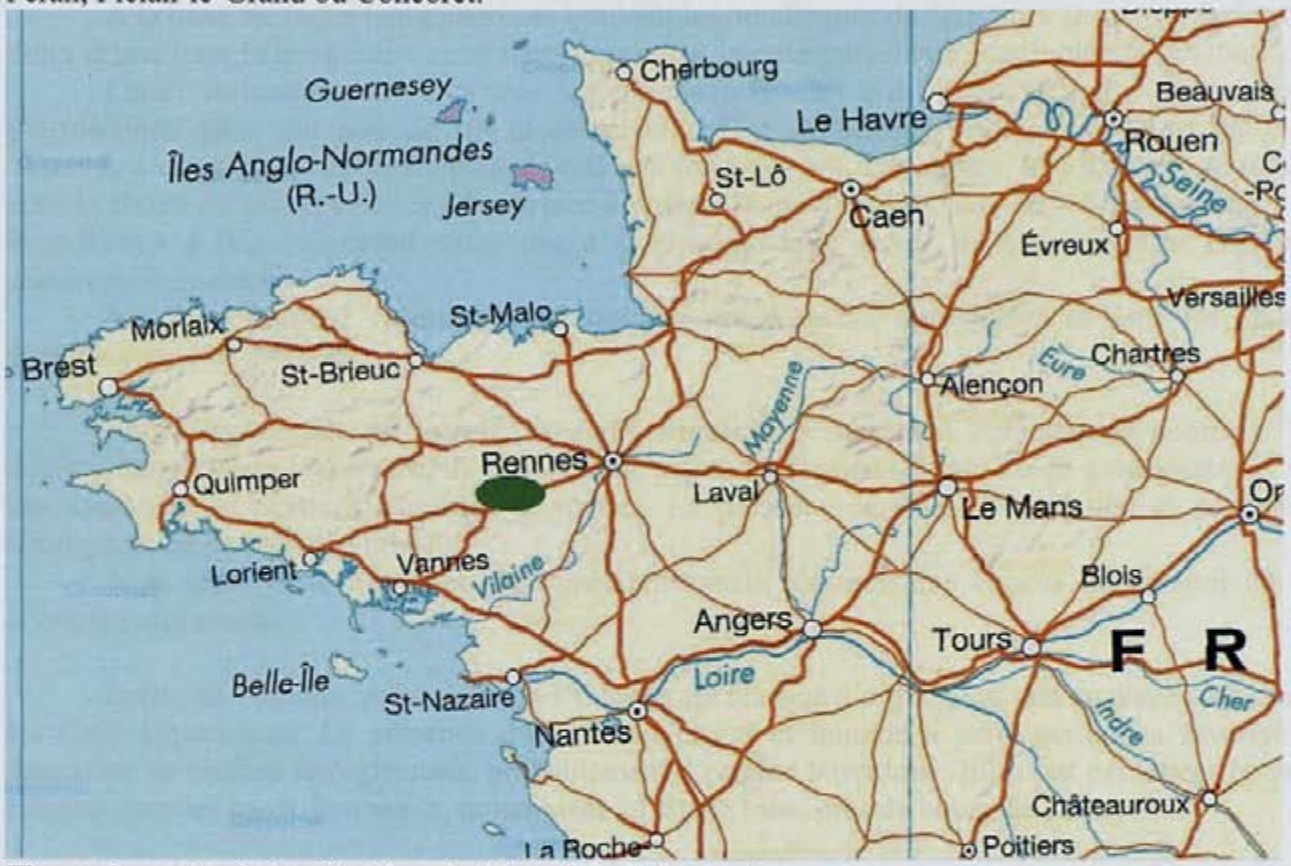


Figure 3 : carte de localisation du Massif de Paimpont.

2. Cadre géologique.

La forêt de Paimpont s'étend sur une seule entité géologique, le synclinal de Paimpont-Guichen. Il s'agit de la partie nord-ouest d'une grande unité sédimentaire qui a été déformée par des plissements à la fin de l'ère primaire : les synclinaux paléozoïques du Sud de Rennes.

Contrairement aux formations classiques de la Vilaine, ce secteur présente des horizons sédimentaires dont le pendage n'est que rarement supérieur à 30°.

L'ensemble des formations, si l'on excepte les filons de quartz, est d'origine détritique terrigène, c'est-à-dire le fruit de l'érosion de reliefs anciens plus ou moins proches. Les particules y ont été arrachées avant de ce déposées dans des bassins sédimentaires fluviatiles ou marins. Il s'agit donc d'argiles, sables, graviers et galets englobés dans une matrice de particules plus fines, puis consolidés. Ils forment alors des poudingues, grès et schistes.

Quatre séries sédimentaires sont présentes sur le massif de Paimpont. Les roches les plus récentes ceinturent les zones de reliefs, où les vallées profondes permettent d'accéder aux formations les plus anciennes.

Les schistes de Rennes et Ploërmel, aussi appelés dalles de Néants, constituent la formation la plus ancienne. On les retrouve autour du massif et dans les zones de plus faibles altitudes en son centre (Tréhorenteuc, Concoret). Il s'agit en fait de schistes et grès verdâtres à gris formés à partir de sédiments marins qui se sont déposés au cours du Briovérien, il y a environ 550 millions d'années. Par endroit des horizons discontinus plus grossiers ont été observés, les poudingues de Gourin (Plaine 1991).

Des strates pourprées paléozoïques discordantes surmontent les niveaux briovériens. Deux grandes catégories peuvent y être identifiées (Bigot 1989) :

A la base, de façon lenticulaire, se trouvent les poudingues de Montfort. Ils ont un faciès très durci et une forte hétérogénéité entre leurs gisements, contrairement aux conglomérats de Gourin.

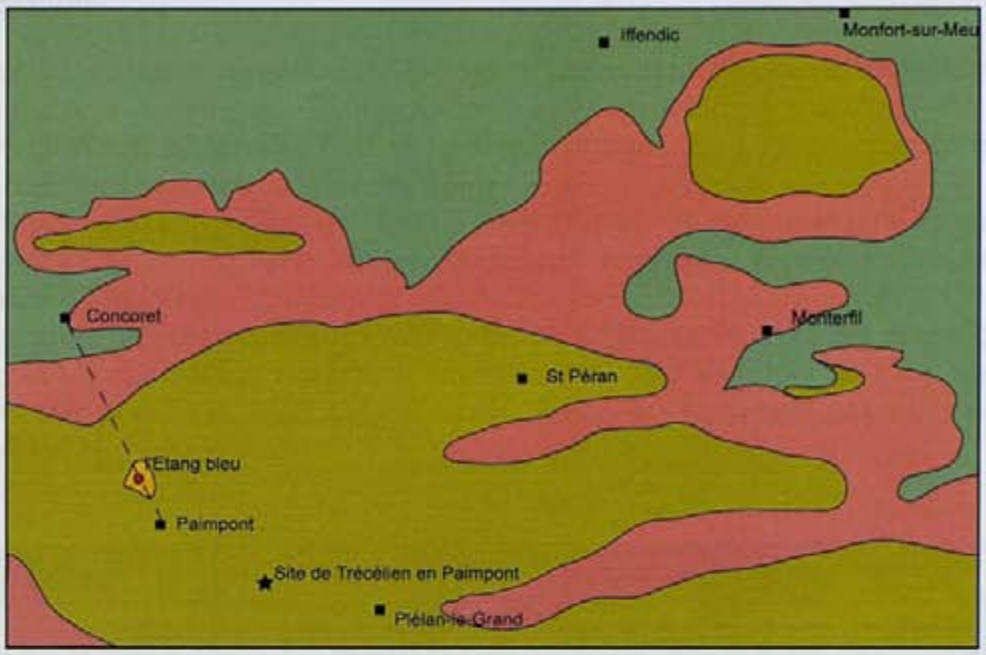
Cette formation se compose essentiellement de grès fins répartis en horizons pluridécimétriques sur près de 100 m d'épaisseur. Une stratification horizontale y est rarement observée à cause de nombreux clivages verticaux très marqués. En surface, elle se présente surtout sous la forme de grandes dalles à la surface inégales. Ils doivent leur nom de « Schistes rouges de Pont-Réan » à leur coloration rouge due à la présence d'un oxyde de fer, l'hématite (Fe_2O_3), disséminé la matrice.

Ses formations se répartissent en bordure des plateaux ordoviciens et dans les vallées encaissées qui les creusent.

En partie centrale du massif, les Grès armoricains succèdent aux schistes pourpres. De couleur beige clair à blanchâtre, ils forment une masse uniforme et compacte de grès quartzeux sur une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres. La présence de rides d'oscillation et vaguelette témoignent de leur origine tidale.

A sa base, cette formation des Grès armoricain présente une couche de minerai de fer d'origine sédimentaire.

Enfin, au Tertiaire, précisément à l'Eocène, un placage d'argile s'est mis en place surtout sur les Grès armoricains. La présence d'un climat chaud et humide à cette période a favorisé la formation de croûtes ferrugineuses, probablement d'origine latéritique. Elles ont exploitées comme minerai pour les hauts-fourneaux, notamment à l'Etang bleu, près du bourg de Paimpont.



croute ferugineuse

Ancienne Minière

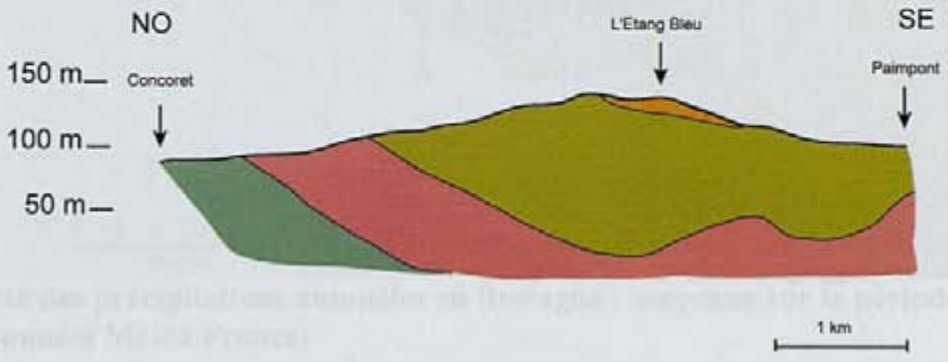
Formation du Grès armoricain [env.475 - 465 MA]
Grès blanc avec couches de minerai de fer dans la moitié inférieure

Formation de Pont-Réan [env.485-475]
schistes et grès rouges et violacés

Briovérien [vers 540 MA]
schiste verdâtre et grès

Coupe Concoret/Paimpont

Carte géologique simplifiée du Massif forestier de Paimpont
(J.J. Chauvel, N. Girault d'après la Carte géologique de France à 1/80000, feuille de Rennes, 3e édition - 1966)



Coupe géologique NO-SE entre Concoret et Paimpont
(J.J. Chauvel, N. Girault d'après la Carte géologique de France à 1/80000 feuille de Rennes, 3e édition - 1966)

Figure 4 : carte géologique du Massif de Paimpont. (d'après JJ Chauvel in (Girault 2005))

3. Cadre climatique.

Situé sur la péninsule armoricaine, la région paimpontaise possède un climat largement soumis aux influences océaniques. Comme toutes les régions à climat océanique elle connaît des hivers doux et pluvieux, et des étés frais et relativement humides. Le maximum de pluviométrie s'observe généralement au cours de la saison froide.

Les données météorologiques de 1997 à 2006 (Figure 5) indiquent que les précipitations annuelles moyennes se situent entre 800 et 900 mm/m² et peuvent localement atteindre jusqu'à 1000 mm/m² (Corillion 1971).

La température moyenne annuelle avoisine les 11°C (Figure 6), avec des hivers cléments (4-5 °C en moyenne) et des valeurs estivales d'environ 17 °C. Sur les lignes de crête, des variations locales peuvent être observées. Elles présentent une baisse des moyennes annuelles de l'ordre de 1 °C (Corillion 1971).

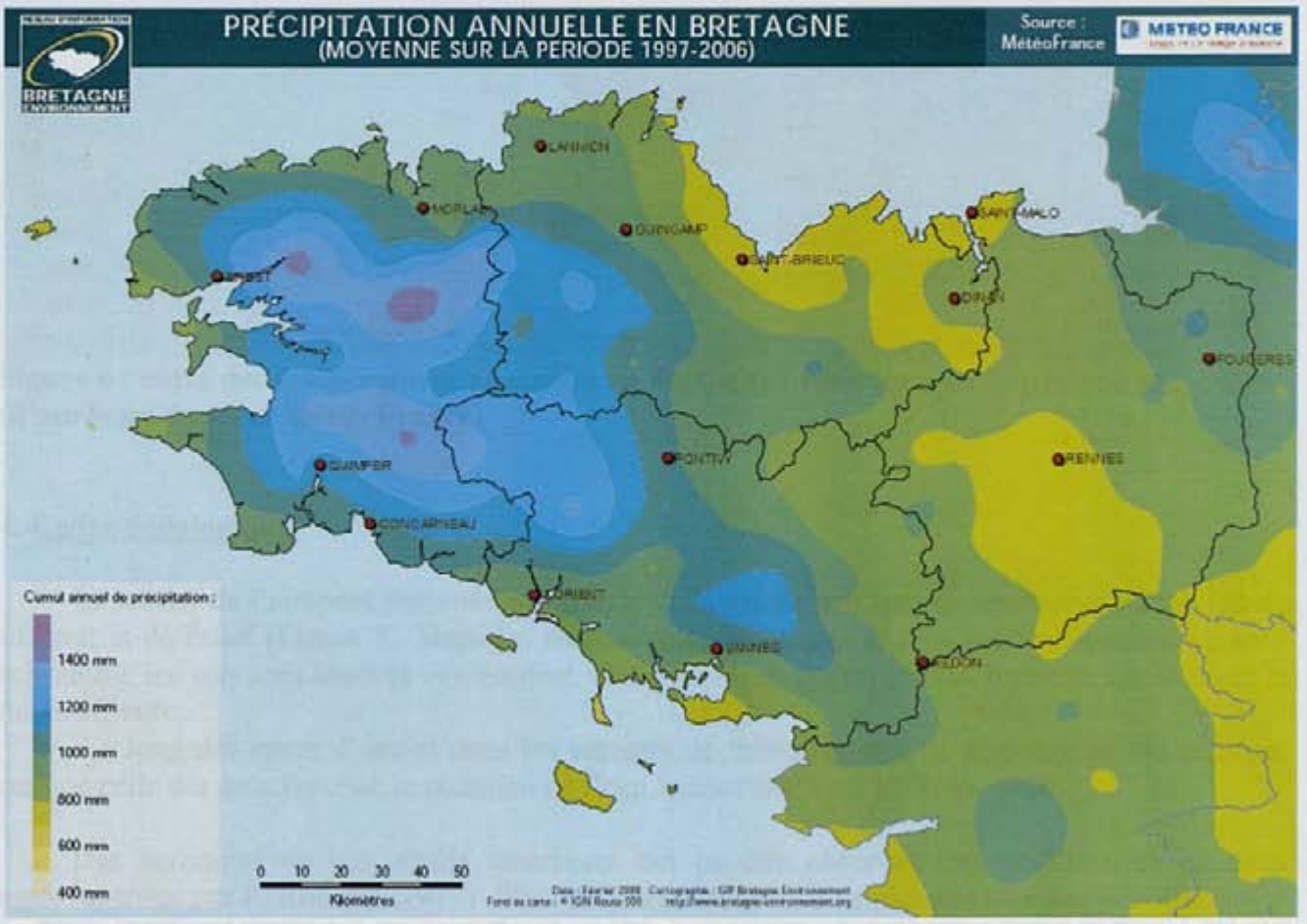


Figure 5 : carte des précipitations annuelles en Bretagne : moyenne sur la période 1997 – 2006 (d'après les données Météo France)

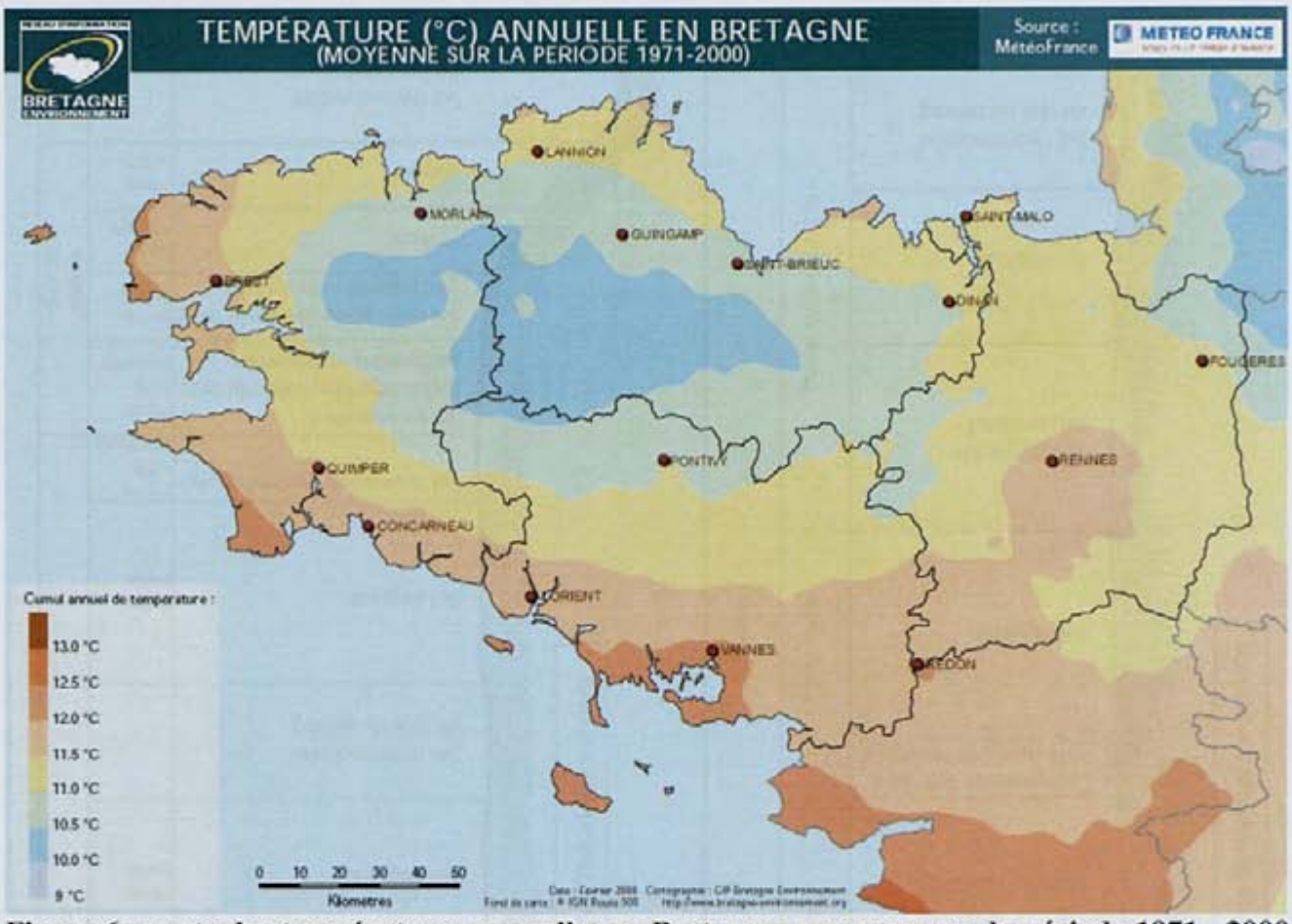


Figure 6 : carte des températures annuelles en Bretagne : moyenne sur la période 1971 - 2000 (d'après les données Météo France)

4. Cadre pédologique.

Le massif de Paimpont présente une grande diversité de sols qui résultent de la variabilité du substrat et du relief (Figure 7). Dans les secteur de fortes pentes et plus particulièrement en zone schisteuse, les sols sont lessivés et s'érodent. Des podzols et des rankers se forment. Localement la roche affleure.

Le long des cours d'eau et dans les secteurs de faibles pentes, la dégradation des schistes, comme celle des grès favorise le maintien de l'eau, créant une forte hydromorphie.

Des variations de ces profils théoriques ont pu être observés lors de l'analyse de deux toposéquences par F. Roussel (1977). Elles sont la conséquence de phénomènes de podzolisation et de dégradation présents plus ou moins localement.

Figure 7 : Pédoséquences théoriques du Massif de Paimpont. a) sur grès. B) sur schistes.

La paléométallurgie

(J.-B. Vivet)

Depuis quelques années maintenant, des sondages et des prospections sont menés en forêt de Paimpont, montrant ainsi que les minerais de fer de ce domaine sont intensivement exploités depuis l'Age du Fer.

Les travaux réalisés en 2010 sur le massif de Paimpont se déclinent en opérations de prospection thématique, sondages et fouille archéologique. Le lancement d'analyses radiocarbone permettant la datation et donc l'interprétation des sites fouillés en 2009 vient compléter le dispositif, ainsi qu'une série d'analyses chimiques sur des scories et minerais.

1. Prospection

Ainsi la prospection au sol (responsable J.-B Vivet) a permis la découverte de 20 nouveaux ateliers métallurgiques, majoritairement des sites dits « à zone rouge », dans un secteur compris globalement entre Paimpont et Plélan-le-Grand, grâce à la persévérance de Jean Boucard, Guy Larcher et Marie-José Legarec notamment. Du sud au nord on recense (Figure 8) :

- quatre sites dans la partie boisée au sud de Le Cannée, dont l'atelier de Moustache, qui a fait l'objet cet été d'un sondage, et quelques indices de sites plus modestes,
- six sites au nord de l'étang des Forges, dans la zone du Breuil au Seigneur, dont cinq ateliers qui ont pu être sondés cet été au lieu dit La Boissière,
- trois sites le long de la « route de La Fenderie au Pas du Houx », entre Trécélien et Péronnette,
- sept sites dans un secteur situé à l'est de la route de Trédéal à Plélan, à l'est de la zone des Glyorels, qui a fait l'objet de nombreuses opérations ces dernières années.
- une dizaine de sites à scorie piégée, situés dans la vallée de l'Aff à proximité du lieu-dit Roche Plate. Une partie d'entre eux a pu être associé à une zone de sédiment rouge.

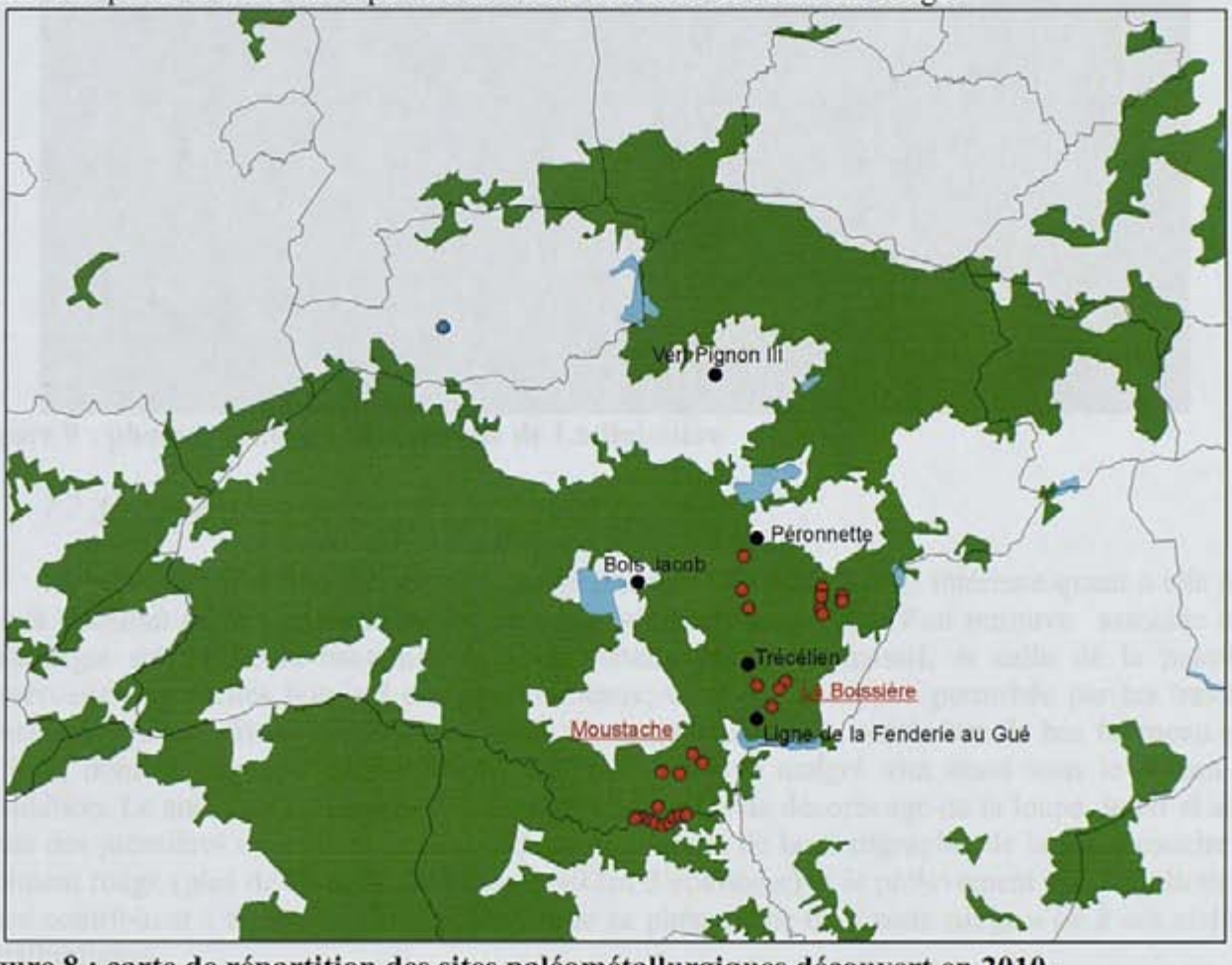


Figure 8 : carte de répartition des sites paléométallurgiques découvert en 2010.

2. Fouilles archéologiques

2.1 Ateliers de La Boissière

Les opérations de sondage menées sur les ateliers de La Boissière (responsable J.-B. Vivet) visaient à explorer une zone étendue (plus de 7 ha) afin de comprendre l'articulation, entre eux des sites apparus en prospection, de même que la possibilité d'un lien de ces derniers avec le site atypique fouillé l'année précédente 130 m plus au sud, sur la Ligne de la Fenderie au Gué. Dans l'attente de datations complémentaires, ces travaux permettent d'aborder la question d'une lignée technique de réduction du minerai de fer appartenant à priori au second âge du Fer, si l'on se réfère aux bouchons d'argile conique découverts sur ces ateliers. La fouille a permis de mettre au jour, de façon tout à fait inédite pour le secteur, un bas fourneau de section circulaire, dont la cuve comporte un parement en pierre(). Des éléments concernant le défournement de l'appareil de réduction et les opérations de post-réduction sont également apparus.

Figure 9 : photographie du four du site de La Boissière

2.2 Atelier de Moustache

L'exploration de l'atelier de Moustache (responsable J.-B. Vivet) intéresse quant à elle à la fois la question de la signification des zones de sédiment rouge, que l'on retrouve associée à la métallurgie sur plusieurs centaines de sites métallurgiques du massif, et celle de la possible conservation de parties hors sol des bas fourneaux, dans une zone peu perturbée par les travaux forestiers. Sous un niveau de sédiment intact d'une quarantaine de centimètre, le bas fourneau mis au jour, dont le diamètre interne atteint 1,20 m, se trouve malgré tout arasé sous le niveau de ventilation. Le site livre à nouveau des témoins importants de décorticage de la loupe de fer et sans doute des premières opérations de post-réduction. L'étude de la stratigraphie de la vaste couche de sédiment rouge (plus de 20 m de diamètre et 40 cm d'épaisseur) et le prélèvement d'échantillons en place contribuent à alimenter l'interprétation de ce phénomène de « zone rouge » lié à ces ateliers métallurgiques.

2.3 Fouille du site de Péronnette

Une opération de fouille programmée a été mise en œuvre sur le site de Péronnette, à proximité de Trudeau (responsable Nicolas Girault). Ces travaux font suite à l'opération de sondage menée en 2008 sur cet atelier de réduction du bas Moyen-Âge installé par ailleurs en bordure d'un site minier, qui invite de ce fait à s'intéresser aux liens possibles entre les aspects miniers et métallurgiques. De nombreuses structures sont apparues au voisinage et sous les ferriers, qui viennent illustrer, pour certaines, des opérations techniques essentielles (grillage, stockage, réduction) et pour d'autres les activités humaines autour des installations (voies, bâtis). Le site livre les vestiges en place d'un bas fourneau qui s'inscrit dans la lignée de ceux mis au jour sur les sites de même nature de cette période (Trécélien, Vert Pignon). Celui-ci vient renseigner de façon précise un aspect fonctionnel important de l'appareil grâce à la conservation *in situ* des écoulements de scories auxquels il a donné naissance. L'activité minière n'est à l'heure actuelle documentée que pour la Période Contemporaine avec la mise au jour d'un puits d'exploration à la recherche du minerai. Enfin, plusieurs indices laissent penser que cette occupation médiévale se superpose, au moins en partie, à une occupation plus ancienne, probablement gauloise, pour laquelle une activité métallurgique associée n'est pas exclue. Quoi qu'il en soit, une présence à long terme dans ce secteur de la forêt semble être confirmée par les études géomorphologique et micromorphologique en cours (M. Grousset, X. Bacheter).

3. Analyses C14.

3.1 Sites protohistoriques

Les premiers enseignements fournis par les datations concernent l'attribution au second Age du Fer de deux bas fourneaux mis au jour sur le site de **La Ligne de la Fenderie au Gué** en 2009 (Figure 10). L'hypothèse d'une telle datation ne tenait qu'à la découverte d'un tesson de céramique de l'Age du Fer sous le niveau d'effondrement d'une des deux structures foyères jumelles (ST 105), interprétées comme les vestiges de deux bas fourneaux en grande partie démantelés (Vivet, 2009).
Les fourchettes de dates calibrées obtenues à 2σ pour ladite structure sont de 511 - 436 av. J.-C. (29,4 %) et **427 - 391 av. J.-C. (66 %)**, avec une distribution relative de probabilité plus élevée pour ces dernières valeurs, renvoie à la période de **La Tène ancienne.**

Malgré une proximité de quelques mètres seulement avec les deux autres séries de bas fourneaux trouvés sur ce site (groupe de 6 et groupe de 2), l'observation de la typologie de ces fours laissait penser qu'ils pouvaient appartenir à une autre lignée technique, vraisemblablement mise en œuvre à une période sensiblement différente. Les fourchettes de dates calibrées, à 2σ, établies sur des charbons de bois appartenant au bas fourneau ST203, 381 - 346 av. J.-C. (18,3 %) et **322 - 206 av. J.-C. (77,1 %)**, orientent vers la période de **La Tène moyenne**, sans recoupement avec la période précédente.

Du point de vue typologique, ces bas fourneaux à scorie piégée, s'écartent notablement de ceux qui livrent des bouchons d'argile conique et de grandes auréoles de sédiment rouge, jusqu' ici tous datés de La Tène moyenne, et qui sont de grande dimension. Leur diamètre interne moyen s'établit en moyenne autour de 1,05 m. Il n'est donc pas impossible que des techniques sensiblement différentes aient pu exister de façon parallèle ou à des périodes relativement peu éloignées dans le temps.
Si ces dates confortent l'existence d'un hiatus entre les périodes de construction et de fonctionnement des deux types différents de bas fourneaux, on s'attendrait plus à l'antériorité de cette deuxième série de fours, de dimensions assez faible (diamètre interne en moyenne égal à 55 cm), aux parois peu nombreuses, par rapport à celle des deux fours jumeaux précédemment décrits. Bien qu'aucun bouchon d'argile n'ait été découvert lors de la fouille, certains aspects tels que le

mode de façonnage des parois tendrait à rapprocher ces derniers de ceux découverts sur le site de La Boissière mentionné plus haut dans la partie consacrée aux sondages.

Ces éléments techniques demandent à être examinés de plus près pour une bonne compréhension de ces lignées. Une seconde analyse au minimum de l'un des fours de la seconde série de bas fourneaux s'avère nécessaire pour conforter ces résultats.

Figure 10 : photographie des fours découverts dans le sondage S2 du site de la Fenderie au Gué.

3.2 Production de fer médiévale

Afin de mieux assurer la datation des ferriers à scories spongieuses du massif de Paimpont, de tenter d'estimer la durée de fonctionnement des ateliers et tenter de reconnaître l'existence des différentes phases d'évolution de ceux-ci, une série de 4 datations radiocarbone a été lancée.

3.2.1 Cohérence des datations des sites à scories spongieuses du massif

Les dates BP obtenues sont proches les unes des autres : elles se retrouvent regroupées entre 660 et 560 BP. Elles viennent confirmer l'attribution de ces ateliers à la période du bas Moyen-Âge. Celles obtenues pour le Vert Pignon III (Vivet et *alii,* 2009) et Péronnette (Girault, 2009), notamment sont très concordantes : 1 datation à 660 BP pour le premier, et 2 datations, 660 et 655 BP pour le second. Les dates calibrées correspondantes, couvrent possiblement deux périodes : **fin du 13e siècle – début 14e siècle** ou **une partie de la deuxième moitié du 14e siècle**, avec des probabilités relatives peu éloignées de 50 %, ce qui ne permet pas de discriminer vraiment celles-ci. La deuxième période est seulement légèrement plus probable que la première.

Des données récentes concernant une des grandes familles de céramique trouvée sur ces sites, et qui proviendrait des ateliers récemment fouillés de Saint-Jean-la-Poterie (56), près de Redon, abondent en ce sens (communication orale Sébastien Daré).

3.2.2 Atelier de Trécélien

La date de **560 BP** obtenue pour l'amas de scories A2, situé au sud du ferrier de **Trécélien,** dans sa partie basse (1317-1354 AD (45,6 %) et **1388-1421 AD (49,8 %)** en datation calibrée, 2 σ), est à confronter avec celle du bas fourneau SF1de la partie haute, sur le bord supérieur du talweg, dont les charbons ont donné **675 BP (1282 à 1387 ap. JC** en datation calibrée, avec une date de plus forte probabilité de 1296), et celle de l'amas A11 qui se trouve encore plus au nord du site, à l'écart sur le plateau, dont la date est de **800 BP** avec une fourchette de datations calibrées (à 2σ), de **1154 à 1287 ap. JC,** et une distribution relative de probabilité de 97,7%.
Cet ensemble de dates tend à confirmer l'hypothèse d'une évolution de l'activité métallurgique du site qui se serait ainsi déplacée depuis le nord-est du site, en hauteur, vers le sud-ouest de celui-ci en contrebas, aux abords du ruisseau de Trécélien. Si l'on en croît les analyses radiocarbone cette évolution s'étend au minimum sur un siècle. Compte tenu des fourchettes d'incertitude, elle pourrait s'étaler en théorie sur au moins deux siècles et demi.
Ce travail demande à être encore conforté et affiné, pour tenter d'estimer le temps consacré par les métallurgistes à ces travaux sidérurgiques, qui ont abouti à une production de plusieurs centaines de tonnes de métal et généré un ferrier évalué à 1300 m^3 de scories (environ 1200 t. de scories). Les volumes très différents des amas selon les secteurs laissent à penser que le niveau d'activité a sans doute beaucoup varié au cours de ce laps de temps.

3.2.3 Atelier du Vert Pignon III

La seule datation C14 disponible pour ce site concernait celle de charbons de bois piégés par l'effondrement d'une structure en torchis directement liée au bas fourneau F2 situé dans les sols d'activité métallurgique supérieurs. Elle signe donc à priori l'arrêt de la production de fer de l'atelier. Sa valeur est de **620 BP (1280 à 1410 ap. J.-C., à 2 σ).** La date fournit par la dernière analyse radiocarbone est, comme on l'a vu de **660 BP (1282-1310 ap. J.-C (46,6 %); 1360-1388 ap. J.-C (48,8 %)).** Elle concerne un charbon situé dans la fosse de drainage du bas fourneau S3, situé stratigraphiquement en dessous des fours F1 et F2. L'élément carboné est donc susceptible de nous renseigner sur une phase antérieure, voire initiale de fonctionnement de l'atelier.

Compte tenu des incertitudes de mesures radiocarbone (plus élevée notamment pour la première analyse, conventionnelle, tandis que la deuxième est plus faible, provenant d'une analyse AMS), les fourchettes de datations calibrées se recouvrent essentiellement. Celles-ci ne se distinguent donc pas à l'échelle d'un peu plus d'un siècle. Il est possible que ces deux phases soient relativement proches. Par suite, la constitution des amas de scories qui se rattachent à ces trois bas fourneaux pourrait avoir eu lieu dans cet intervalle de temps. Il faudrait reprendre l'étude stratigraphique de façon fine pour tenter de savoir jusqu'où s'étendent les amas en question dans cette partie sud du ferrier. On rappellera simplement que le volume de ce dernier est estimé à 850 m^3 (environ 750 t).
La partie nord du ferrier a livré les vestiges de deux autres bas fourneaux. Il serait utile de poursuivre cette recherche chronologique par le biais des analyses C14 pour résoudre les problématiques énoncées précédemment, relatives à la formation de ces ferriers et au phasage de l'activité de l'atelier. L'enregistrement d'une séquence stratigraphique dans ce secteur nord où apparaissait de façon répétitive des niveaux illustrant une série de phases opératoires, de même que le prélèvement d'échantillons carbonés au sein de ces couches a été réalisé. Ils pourraient constituer un outil très utile en la matière.

D'une manière générale l'étude du mobilier céramique de ces sites, dans leur contexte, pourrait être reprise à la lumière des dernières avancées en la matière, en corrélation avec les datations C14, pour encore mieux préciser les phases essentielles d'activité de ces ateliers métallurgiques médiévaux.

4. Analyses métallurgiques (C. Le Carlier)

Depuis le début de ces recherches paléométallurgiques à Paimpont en 2002, des analyses chimiques ont été réalisées sur des échantillons provenant de quelques sites. Cependant, pour pouvoir mieux cerner les différences possibles, soit entre les différentes zones de la forêt, soit entre les procédés utilisés aux différentes époques, il est nécessaire de disposer d'un nombre suffisant de ces analyses. C'est pourquoi, depuis 2009, une campagne d'analyse de nouveaux échantillons issus de la métallurgie du fer et de minerais naturels a été engagée. En 2009, ces analyses ont été réalisées grâce à des fonds issus de l'UMR 6566 CReAAH. En 2010, cette problématique entrant dans le cadre du PCR, c'est ce dernier qui a financé les analyses.

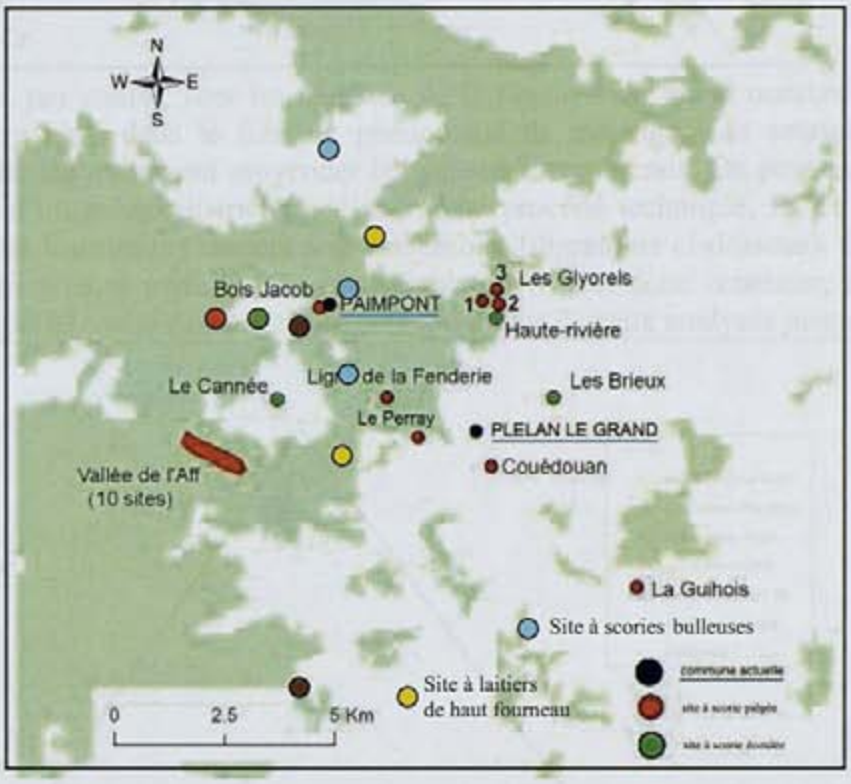
4.1 Présentation de la banque de données

En 2010, les analyses réalisées sont au nombre de 25. Elles proviennent de différents sites de la forêt : 19 échantillons sont liés à des activités de l'Age du Fer (Bois Jacob, Vallée de l'Aff, Couedouan, Le Perray, La fenderie au Gué, Haute Rivière, Glyorel, Etang de Paimpont) ; 2 échantillons sont liés à l'activité médiévale (Trécélien, Péronnette) ; 1 autre est lié à une activité de post-réduction à une période postérieure à l'installation des forges à Paimpont ; 2 pourraient être rapprochés de l'époque gallo-romaine (La Croix du Houx, Les Brieux). Un dernier échantillon de minerai a été prélevé auprès d'une très grande minière (La Moutte) pur laquelle une datation exacte n'est pas réellement possible.

2505	bois Jacob	scorie écoulée
2506	Vallée de l'Aff	scorie piégée
2507	Vallée de l'Aff	scorie piégée
2508	bois Jacob	minerai
2509	Couedouan	scorie piégée
2510	Le Perray	scorie piégée
2511	Ligne de la Fenderie au Gué	scorie piégée
2512	Ligne de la Fenderie au Gué	scorie piégée
2513	Ligne de la Fenderie au Gué	scorie piégée
2514	Ligne de la Fenderie au Gué	minerai
2515	Trécélien	minerai
2516	Ligne de la Fenderie au Gué	minerai
2517	Les forges	scorie en culot
2518	Haute rivière	scorie écoulée
2519	Haute rivière	scorie interne
2520	Haute rivière	scorie en culot
2521	Glyorel 3	scorie piégée
2522	Croix du Houx	scorie écoulée
2523	Etang de Paimpont	scorie piégée
2524	Etang de Paimpont	scorie piégée
2525	Les Brieux	scorie écoulée
2526	Perronnette	minerai
2527	La Moutte	minerai
2528	Couedouan	minerai
2529	Couedouan	minerai

En prenant en compte les analyses des années précédentes, on peut ainsi définir le corpus : 6 analyses concernent des scories écoulées denses dont la typologie peut laisser penser à une période gallo-romaine, voire à du Haut Moyen Age (points verts sur la carte) ; 14 analyses concernent les scories piégées de l'Age du Fer (points rouges) ; 3 analyses concernent les scories écoulées de l'Age du Fer (point vert de haute Rivière) ; 5 analyses correspondent à la fin de la période médiévale (points bleu clair) ; 1 correspond à l'affinage après l'installation des hauts fourneaux aux Forges (point jaune) ; 2 correspondent à l'étape de post-réduction de la fin de la période médiévale (points bleus clairs) et 11 analyses correspondent à des laitiers issus de hauts fourneaux (points jaunes). Enfin, 20 analyses correspondent à des fragments de minerais, pris sur les sites sidérurgiques, que ce soit des fragments de minerai brut ou des fragments de minerai grillé ; ou prélevés sur les rares affleurements géologiques encore visibles et accessibles.

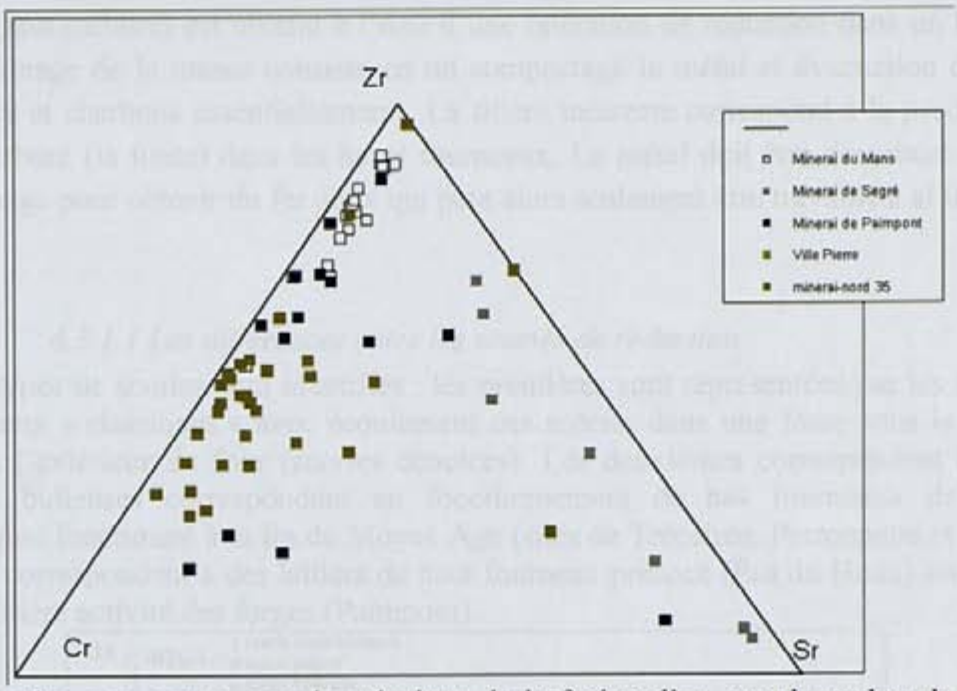
Nous disposons donc maintenant dans la base d'un nombre d'analyses suffisant pour commencer à voir des tendances et des différences. Cependant, il est encore nécessaire de confirmer ces observations par des analyses complémentaires. En effet, définir un site sur la base d'une seule analyse n'est pas suffisant.



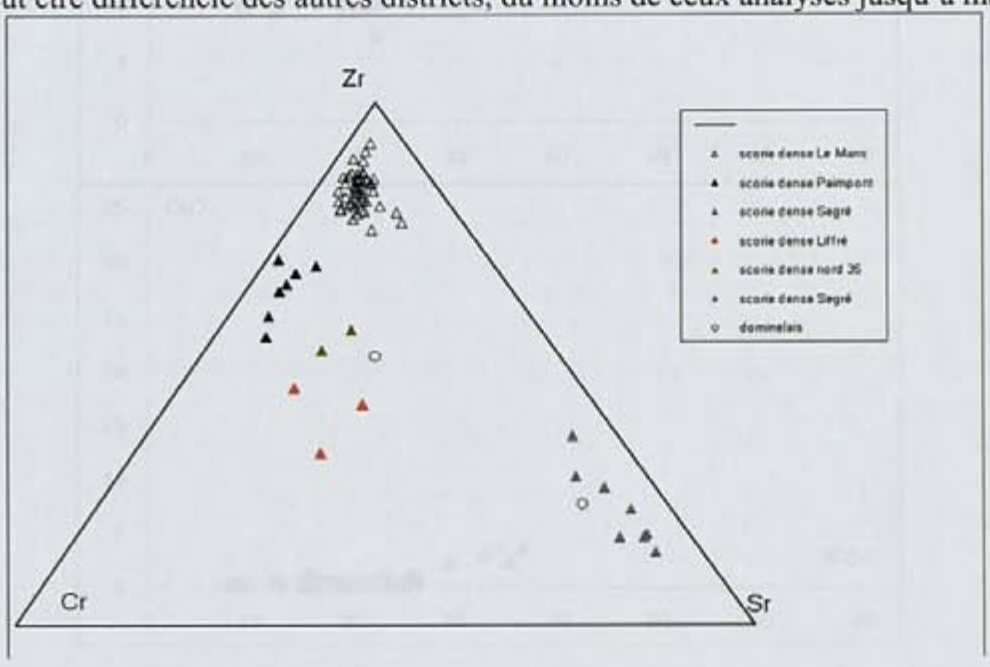
4.2 Une signature générale du secteur de Paimpont ?

La banque de données d'analyses réalisées sur la forêt de Paimpont peut être comparée à une banque de données sur le Grand Ouest composée d'un plus grand nombre de données encore. Ainsi, il est possible de comparer Paimpont, avec la région de Segré (analyses non publiées, C. Le Carlier et A. Ploquin), avec la région du Mans (analyses non publiées fouilles A28), avec le nord du département d'Ille et Vilaine (Vivet, 2009), et quelques unes venant de Liffré, Mautauban et La dominelais (non publiés, C. le Carlier).

En prenant uniquement les analyses de minerai, il est difficile de faire la différence entre ces différents districts. En effet, bien qu'il y ait des caractères chimiques communs pour chaque type de minerai, chaque fragment peut présenter une certaine variabilité, qui fait que les écarts entre ces minerais ne sont parfois plus visibles. On peut noter que les minerais de Segré sont en moyenne plus riches en Sr et que les minerais du Mans sont légèrement plus riches en moyenne en MnO. Même les rapports entre éléments chimiques (que l'on reproduit sur des diagrammes ternaires) ne donnent pas de résultats probants.



Les scories, par contre, sont les résultats de la fusion d'un grand nombre de fragments de minerais, il s'opère ainsi dans le four un phénomène de mélange. Les scories issues de cette opération vont donc naturellement moyenner les valeurs des minerais. On peut alors constater que les scories issues d'un même district (et d'un même procédé technique, ici ce sont des scories denses issues de bas fourneaux) tendent à se rassembler (digramme ci-dessous). Les scories issues des différents districts sont parfaitement identifiables. On peut donc constater, que le district de Paimpont peut être différencié des autres districts, du moins de ceux analysés jusqu'à maintenant.



4.3 A Paimpont, une signature possible des différents types de scories ?

Dans le paragraphe introductif, ont été listées les différentes sortes de scories. Celles-ci correspondent à différentes étapes de la chaîne opératoire :

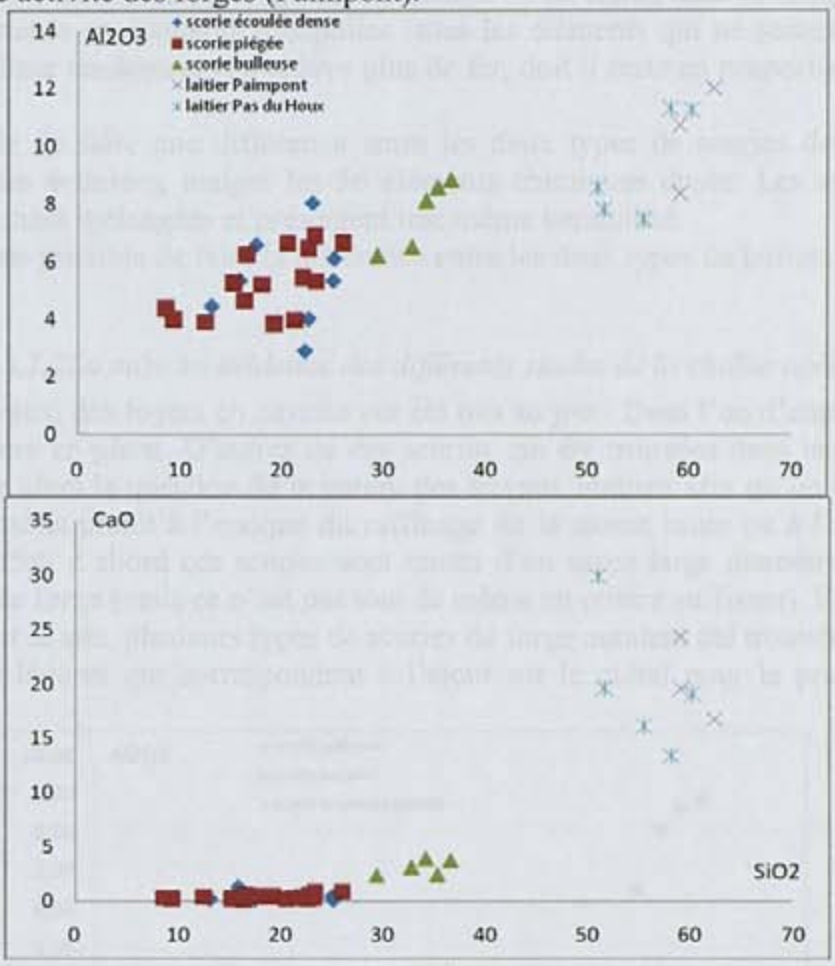
1- Ce peut être également des scories de réduction qui correspondent à plusieurs époques d'exploitation.

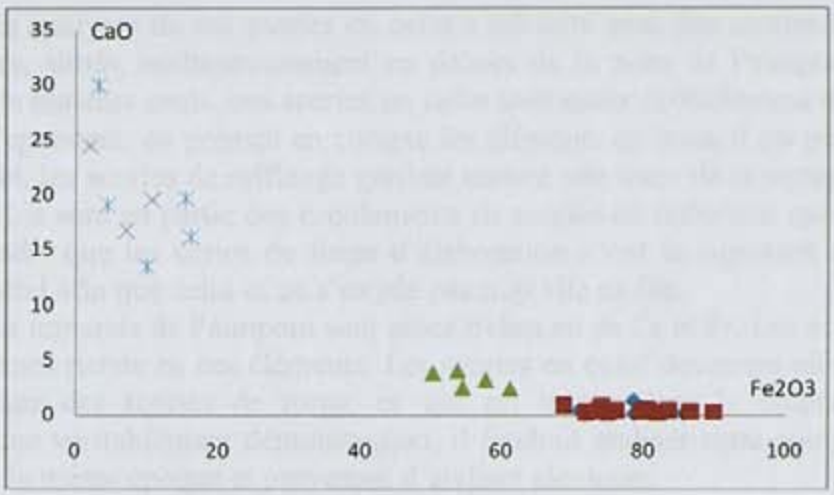
2- Ce peut être soit des scories de réduction, soit des scories de post-réduction (raffinage de la masse de métal en filière directe, ou affinage de la fonte en filière indirecte). Pour rappel, la filière directe correspond globalement aux premiers temps de la métallurgie lorsque le fer

doux (non carburé) est obtenu à l'issu d'une opération de réduction dans un bas fourneau. Le raffinage de la masse consiste en un compactage le métal et évacuation des impuretés (scories et charbons essentiellement). La filière indirecte correspond à la production de fer très carburé (la fonte) dans les hauts fourneaux. Le métal doit être décarburé dans un four d'affinage pour obtenir du fer doux qui peut alors seulement être travaillé à al forge.

4.3.1.1 Les différences entre les scories de réduction

Trois grands types de scories sont identifiés : les premières sont représentées par les scories issues de bas fourneaux « classiques » avec écoulement des scories dans une fosse sous le four (scories piégées) ou à l'extérieur du four (scories écoulées). Les deuxièmes correspondent à des scories écoulées très bulleuses correspondant au fonctionnement de bas fourneaux de très petites dimensions ayant fonctionné à la fin du Moyen Age (sites de Trécélien, Perronnette et vert Pignon). Les dernières correspondent à des laitiers de haut fourneau précoce (Pas du Houx) ou à des laitiers issus de la dernière activité des forges (Paimpont).

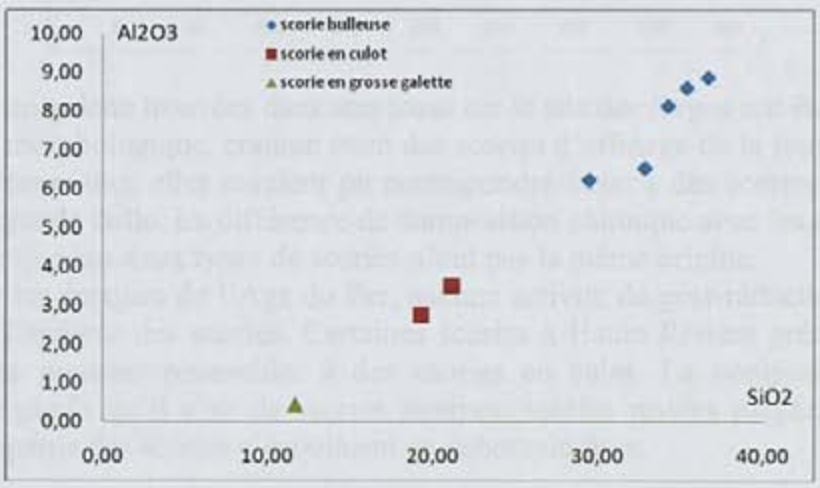




Sur les diagrammes ci-dessus les trois grands groupes definis plus haut sont parfaitement identifiables : les scories denses, les scories bulleuses et les laitiers, avec une richesse plus importante en CaO des laitiers due aux ajouts de calcaire ou de chaux dans la charge du four, et une richesse plus importante en éléments lithophiles (tous les éléments qui ne restent pas associés au fer) à cause du meilleur rendement (on enlève plus de fer, doit il reste en proportion plus des autres éléments).
Il n'est pas possible de faire une différence entre les deux types de scories denses : les scories piégées et les scories écoulées, malgré les 56 éléments chimiques dosés. Les analyses des deux groupes sont intimement mélangées et présentent une même variabilité.
Il n'est également pas possible de faire la différence entre les deux types de laitiers.

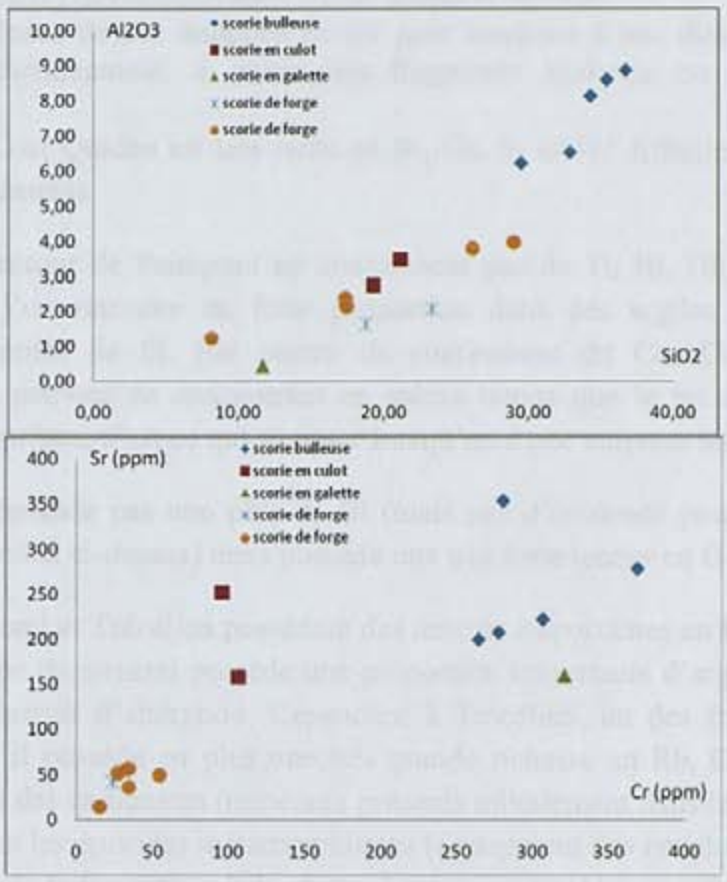
4.3.1.2La mise en évidence des différents stades de la chaîne opératoire

Sur les sites médiévaux, des foyers en cuvette ont été mis au jour. Dans l'un d'entre eux, une scorie en calotte était encore en place. D'autres de ces scories ont été trouvées dans les amas de scories médiévaux. Se pose alors la question de la nature des travaux réalisés afin qu'un tel type de scorie se forme. Nous pensons plutôt à l'époque du raffinage de la masse brute qu'à l'étape de la forge d'élaboration. En effet, d'abord ces scories sont toutes d'un assez large diamètre, qui correspond moins aux travaux de forge (mais ce n'est pas tout de même un critère suffisant). Ensuite, si la forge avait été présente sur le site, plusieurs types de scories de forge auraient été trouvés (notamment des scories informes et légères qui correspondent à l'ajout sur le métal pour le protéger d'une trop grande oxydation).



Les analyses chimiques réalisées finissent définitivement de différencier les scories en calotte (ou en culot) d'avec les scories de réduction des mêmes sites (l'ensemble des scories est tellement informes que des confusion sont très facilement faites).

La comparaison des analyses de ces scories en culot a été faite avec des scories de forge issues de sites archéologiques, situés, malheureusement en dehors de la zone de Paimpont. En prenant en compte les éléments majeurs seuls, ces scories en culot sont assez difficilement différenciables des scories de forge. Cependant, en prenant en compte les éléments en trace il est possible de voir des différences. En effet, les scories de raffinage gardent encore une trace de la signature chimique des minerais d'origine (ce sont en partie des écoulements de scories de réduction qui se concentrent au fond du foyer), tandis que les cories de forge d'élaboration n'ont la signature chimique que des ajouts mis sur le métal afin que celui-ci ne s'oxyde pas trop vite au feu.
On peut voir que les minerais de Paimpont sont assez riches en en Cr et Sr. Les scories de réduction sont donc elles-mêmes riches en ces éléments. Les scories en culot devraient alors être plus riches en ces éléments que des scories de forge, ce qui est le cas dans le diagramme ci-dessous. Néanmoins, pour une véritablement démonstration, il faudrait réaliser cette comparaison avec des scories de forge de la même époque et provenant d'ateliers alentours.



Les grosses scories en galette trouvées dans une fosse sur le site des forges ont été identifiées, sur la base de leur aspect morphologique, comme étant des scories d'affinage de la fonte, fonte sortant de hauts fourneaux. Néanmoins, elles auraient pu correspondre aussi à des scories de raffinage dans des foyers de plus grande taille. La différence de composition chimique avec les scories en culot est très nette, et montre que ces deux types de scories n'ont pas la même origine.
Actuellement, pour les époques de l'Age du Fer, aucune activité de post-réduction n'a été mise en évidence à travers l'analyse des scories. Certaines scories à Haute Rivière présentent des formes trapues et arrondies pouvant ressembler à des csories en culot. La composition chimique de l'ensemble indique plutôt qu'il s'ait de scories internes, scories restées piégées au fond du four tandis qu'une autre partie des scories s'écoulaient en dehors du four.

4.4 - A Paimpont, une influence du type de minerai sur la composition des scories ?

Avec la base de données dont nous disposons, nous pouvons commencer à approcher la variabilité chimique des minerais présent dans la forêt de Paimpont. En effet, plusieurs types de minerais

peuvent être présents soit dans des zones géographiques différentes, soit dans une même zone, mais en plusieurs positionnements stratigraphiques.
Ainsi, le massif de Paimpont s'inscrit sur une seule unité géologique, l'unité de Paimpont-Guichen. L'originalité de ce domaine est d'être un empilement de couches sédimentaires restées globalement horizontales, leur pendage dépassant rarement 30°. L'unité de Paimpont est restée relativement protégée de la déformation régionale qui a affecté les régions plus au sud (Anjou). La topographie issue de l'érosion et le rejeu des nombreuses failles, jouent un rôle important dans la grande largeur à l'affleurement des formations. Les gisements d'altération proviennent soit d'une altération sur place des formations superficielles (type minières de Bretagne qui se situent généralement au voisinage des affleurements des couches de minerais ordoviciens), soit d'un transport et d'une sédimentation à l'Eocène-Oligocène (type sidérolithique). Ces dépôts ferrugineux, continentaux, que l'on trouve actuellement sous forme de lambeaux discontinus peuvent être constitués d'éboulis conservés in-situ ou re-sédimentés dans des cuvettes après transport, ou correspondre à des dépôts de type latéritique (cuirasse) développés sous climat chaud et humide.
La diversité dans la génèse de ces minerais de fer peut conduire à une diversité de composition chimique. Ainsi, synthétiquement, à partir des fragments analysés on peut remarquer des différences.

- Le minerai de Coat Quidan est très riche en Bi, Ga, Sr et W/ difficile de comprendre cette association d'éléments.

- Les fragments autour de Paimpont ne contiennent pas de Ti, Bi, Hf, Nb, Ta, Th, Zr, Al, (éléments que l'on retrouve en forte proportion dans des argiles et dans les passées gréseuses) et moins de Si. Par contre ils contiennent du Co, Cu, Ni, Zn (éléments métalliques qui peuvent se concentrent en même temps que le fer lors des phénomènes d'altération de surface, c'est ce qui se passe lorsqu'on a une cuirasse latéritique).

- Couedouan ne possède pas non plus de Bi (mais pas d'évidence pour les autres éléments cités immédiatement ci-dessus) mais possède une très forte teneur en Ge.

- Bois Jacob, Glyorel et Trécélien possédent des teneurs importantes en Bi et Al et Cr , ce qui laisse que ce type de minerai possède une proportion importante d'argiles. Cela fait penser plutôt à des minerais d'altération. Cependant à Trécélien, un des fragments montre une particularité car il possède en plus une très grande richesse en Rb, Cs, K et Ca, qui peut correspondre à à des carbonates (minéraux présents initialement dans les minerais de couche ordoviciens avant les épisodes métamorphiques (écrasement des couches (haute température et pression) lors de la formation de la chaîne hercynienne)). Un autre fragment montre quant à lui une teneur très forte en As. Trois types de minerais seraient alors exploités à Trécélien.

- Les autres fragments de minerais analysés restent quant à eux dans la moyenne (une plus grande richesse en Sb pour le fragment de Perronnette, à confirmer) : ils proviennent de La Moutte, La Fenderie, et Vert Pignon.

Cette variabilité chimique visible au niveau des minerais ne se retrouve pourtant pas au niveau des scories. Les variations observées entre les différentes scories denses (scories écoulées et scories piégées) ne sont pas suffisamment marquées et ne se rapproche pas des fragments de minerai analysés. Il en est de même pour les scories bulleuses médiévales.
Une hypothèse serait que plusieurs types de minerais ont été systématiquement employés sur les différents sites, donc à différentes époques, mélangeant ainsi les signatures chimiques des minerais et moyennant le tout.

Les sites d'habitat et autres occupations

En début d'année, la carte archéologique de Bretagne recensait 516 sites sur le territoire concerné par ce programme de recherche (Figure 11). Malgré une répartition assez homogène au premier abord, l'examen attentif de la carte révèle des secteurs pauvres en vestiges comme les communes de Plélan-le-Grand, Maxent et Saint Malon (10 sites à elles trois) ou encore celle de Saint Péran où aucun vestige n'est mentionné. A l'inverse, le secteur de Paimpont et principalement ces clairières sont très riches en vestiges.

Au cours de cette année, nous avons travaillé sur cet axe du PCR, selon deux approches. Dans un premier temps, nous avons repris les données issues des prospections précédentes. Près de 1200 indices d'occupations y ont été inventoriés (Oillic 2008, 2009 ; Figure 13). Parmi celles-ci nous citerons 4 nouveaux sites mégalithiques, près de400 amas de pierres d'origines anthropique et plus de 800 charbonnières. Cette démarche s'intègre dans un projet de mise en place d'un Système d'Information Géographique sur la zone PCR comme outil d'aide à l'analyse de la répartition des vestiges.

Dans un second temps, nous avons menés de nouvelles prospections en zone forestière mais également dans les secteurs agricoles (Figure 12). Si l'on dresse un premier bilan de cette activité encore en cours, il est possible de dénombrer 4 nouveaux sites mégalithiques, 2 enclos. Il nous a également été fait mention de 2 sites *a priori* gallo-romains et d'indices d'occupations préhistoriques (silex taillés). Nous avons également tenter une prospection au fond de l'étang de Paimpont à l'aide d'un sonar. Cette opération a révélé la présence d'une ancienne digue, de probables aménagements piscicoles ainsi qu'un éventuel tertre (Figure 14).

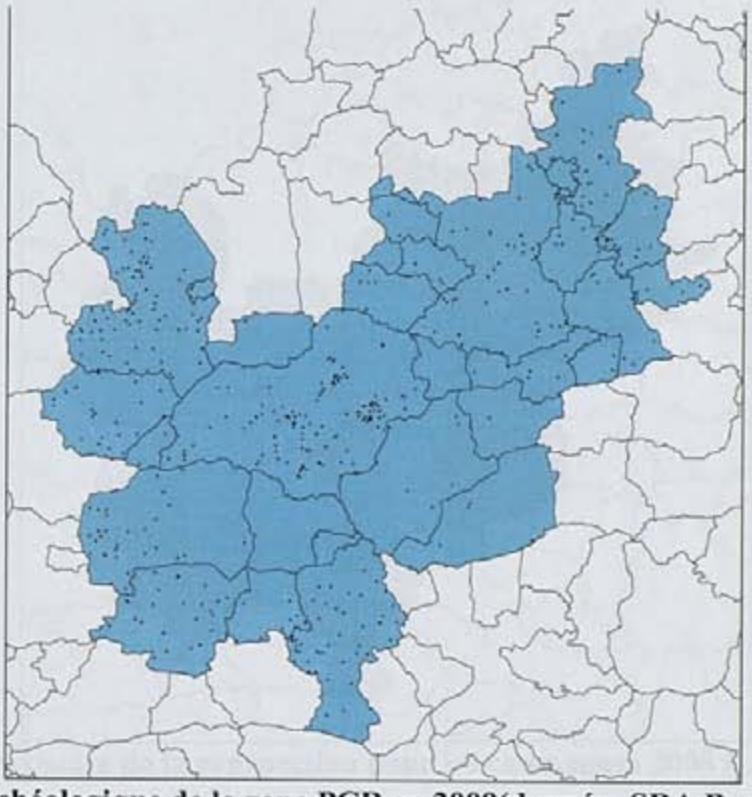


Figure 11 : Carte archéologique de la zone PCR en 2009(données SRA Bretagne)

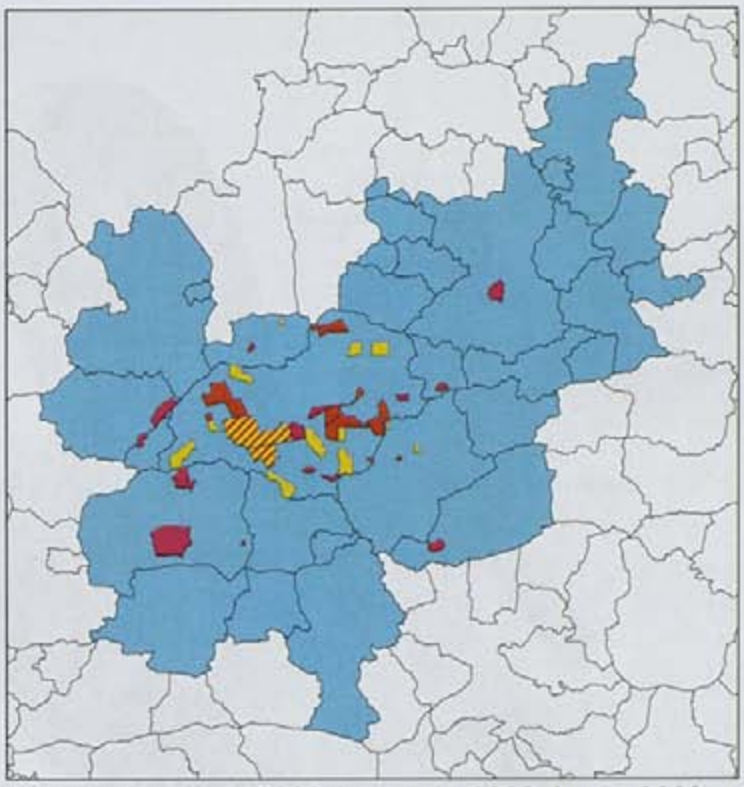


Figure 12 : Secteurs prospectés depuis 2008 (en rouge 2008, jaune 2009 et rose 2010)

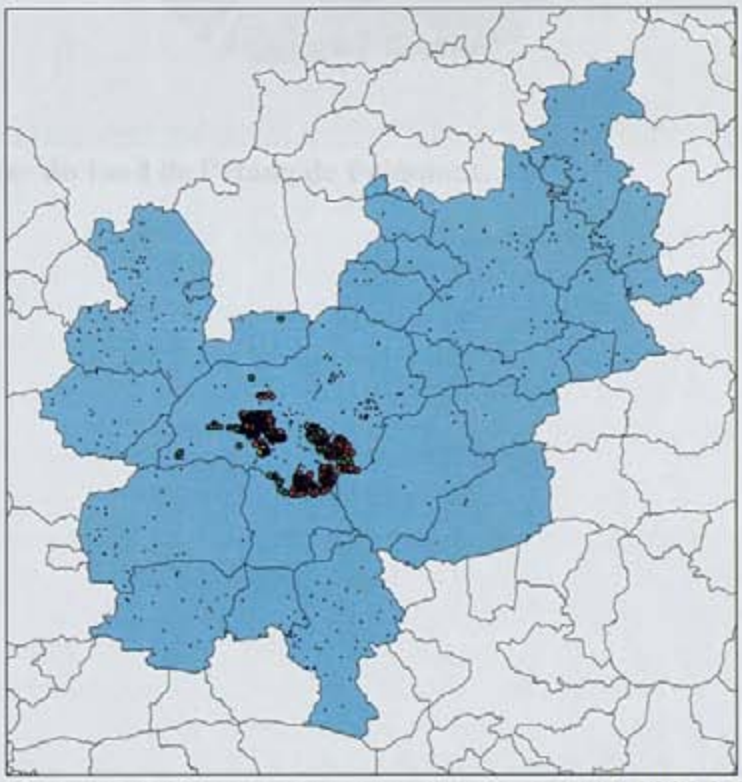


Figure 13 : bilan provisoire de la prospection pour les campagnes 2008 à 2010.

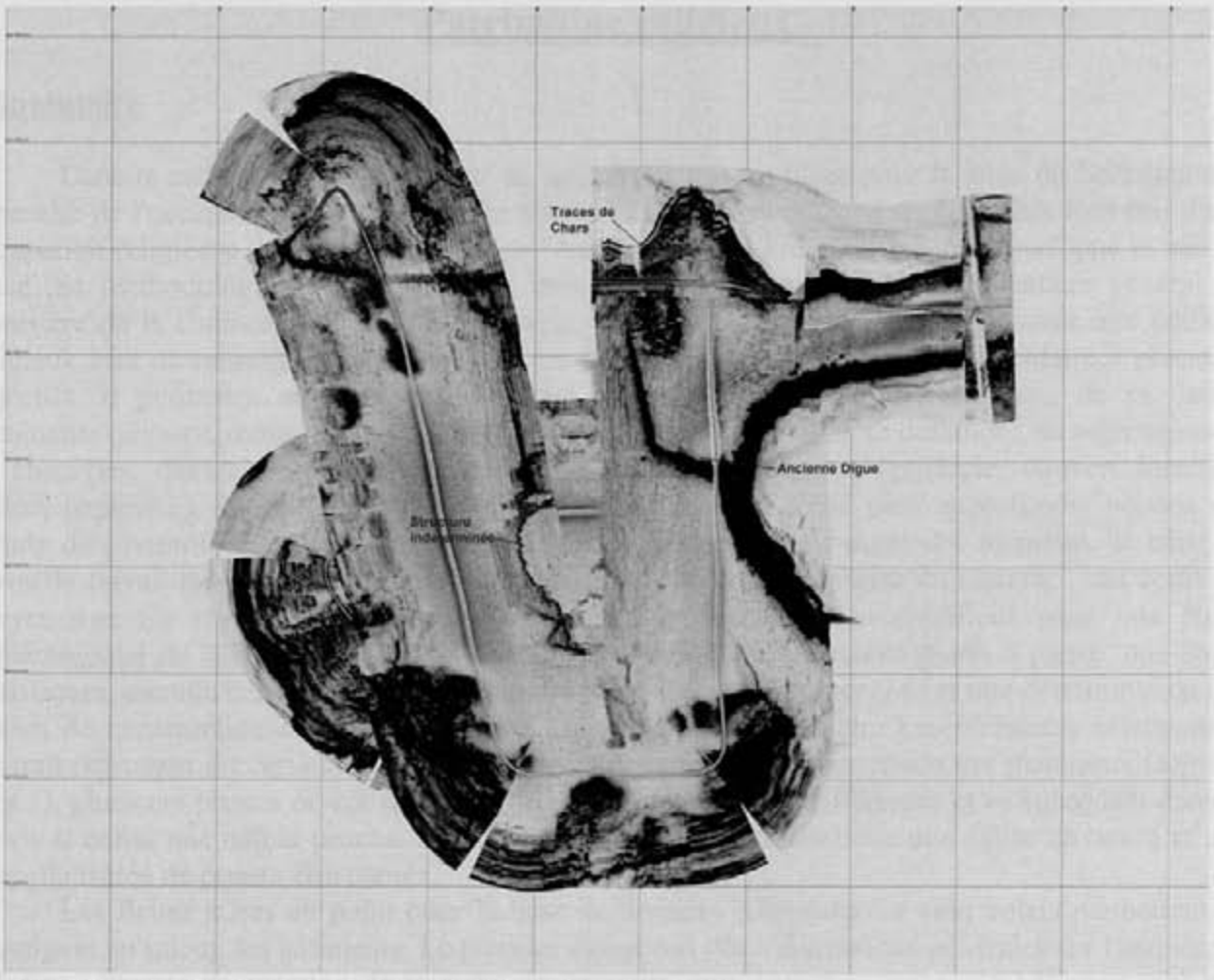


Figure 14 : relevé sonar du fond de l'étang de Paimpont.

Patrimoine religieux

1. Inventaire

Dans le cadre du Projet Collectif de Recherche mis en place pour la zone de Brécilien une approche de l'occupation religieuse est en cours. Les premiers documents consultés font état d'une occupation religieuse dense sur le territoire. Aussi un inventaire détaillé a été développé et mis en place. Sa méthodologie se base sur celle mise en place et utilisée pour l'Inventaire général du Ministère de la Culture pour la France entière. Cette dernière à bien sûr été adaptée aux édifices religieux afin de renseigner au mieux tous les bâtiments de cette zone. Cet inventaire à plusieurs objectifs. Il permettra en effet de se rendre compte de l'occupation religieuse, de sa nature dominante (abbaye, monastère, chapelles...) et de voir des ensembles se dessiner : un regroupement de chapelles, d'oratoires ou une répartition selon l'environnement (géologie, couvert forestier, vallée, hauteur...). Le second objectif s'inscrit dans une recherche plus approfondie portant sur l'étude de l'évolution non seulement des bâtiments religieux mais aussi des manières de bâtir. À savoir le travail des blocs, leur répartition dans les bâtiments, leur mise en oeuvre, ...au cours du Moyen-Age Ce travail de recherche se basera sur une sélection d'édifices pour une étude archéologique du bâti approfondie de chacun. Ceci comprend un relevé pierre à pierre, une étude statistiques, comme celle menée sur la chapelle Saint-Etienne de Guer (56) et une détermination des phases de construction et de leur datation, quand cela sera possible. Les bâtiments sélectionnés devront regrouper un certain nombres de critères communs : une similitude des matériaux (schiste, grès...), plusieurs phases de construction, des dates d'édification différentes et se succédant dans le temps et enfin, une nature proche. En aucun cas, une comparaison entre une église de bourg et une chapelle isolée ne pourra être menée.

Les fiches mises au point pour la base de données comporteront cinq volets permettant de renseigner au mieux les bâtiments. Le premier comprend des informations générales sur l'enquête et l'édifice : l'année de création de la fiche, le contexte dans lequel se trouve le bâtiment (abbaye, monastère,, chapellenie) et la nature du bâtiment (chapelle, église, oratoire). Le vocable sera également signalé. Certains d'entre eux sont une aide précieuse pour évaluer la date d'édification du bâtiment. En effet, dans les archives il sera plus aisé de repérer ce nom et d'être sûr de l'identification. Ce volet se termine par la localisation du bâtiment (région, département, canton, commune, numéro INSEE) et les instituts religieux auxquels il est rattaché (paroisse, évêché). À partir de ces derniers renseignement, une carte de répartition pourra être établie et ainsi il sera possible d'envisager des répartitions remarquables en fonction de la nature des bâtiments, de la nature de l'occupation (abbaye, monastère...).

Le deuxième volet concerne l'histoire du bâtiment. Il y aura à la fois l'historique de l'édifice actuel et des informations sur ceux qui l'ont précédés à cet emplacement. Selon les renseignements obtenus (archives, écrits..) les données seront plus ou moins précises. Dans certains cas, il sera possible d'avoir une date d'édification. Les différents travaux, de rénovation ou restauration seront également renseignés. Pour chacun d'entre eux, une comparaison entre le plan cadastral dit napoléonien et le cadastre actuel sera effectuée. Ainsi, il sera possible de se référer aux matrices cadastrales l'accompagnant. D'autres informations, concernant le prieuré ou la paroisse en eux-même seront retranscrites ici. Les DROITS du prieuré ou de la paroisse, les possessions et bénéfices, les desservants (DESS) et les trèves qu'il possède ou, si c'est une trève, à qui elle appartient.

Le troisième volet est la description de l'édifice. Plusieurs éléments seront renseigner avec des termes précis issus du dictionnaire d'architecture de Pérouse de Montclos, qui reste l'ouvrage de référence en matière d'architecture, et le thésaurus déterminé par le Ministère de la culture (Document et méthode n°7). Un champ à texte libre offrira la possibilité de faire la description complète reprenant les informations données dans les différents champs (murs, toit, couverture, plans) ainsi que celles portant sur les ouvertures, les décors, les maçonneries...

Le quatrième volet sera consacré aux sources (archives, plans, relevés..) et à la bibliographie.

Le cinquième et dernier concerne les protections dont bénéficie le bâtiment (MH, classé, inscrit..), ainsi que son statut (privé, public). Ce type de renseignement peut faire partie des critères de sélection pour une étude archéologique puisque les protections ou les propriétaires ne permettront pas toujours une étude approfondie.

A ce jour la base de données est mise en place et l'inventaire est en cours. Plus d'une vingtaine d'édifices sont déjà répertoriés et leur fiche établie. La suite du travail va se poursuivre sur le terrain, les archives et les bibliothèques afin de reconnaître les bâtiments, étudier les archives qui s'y rattachent et l'historiographie déjà faite à leur sujet.

2. Etude du bâti : la chapelle Saint-Etienne (Mémoire E. Merdy)

Archéologie du bâti et origine des matériaux : du nouveau pour la chapelle Saint-Étienne de Guer (56)

archaeology of framework and material origin : news for Saint-Etienne chapel (56)

Résumé : le but de cette étude était d'appréhender l'évolution de l'économie de chantier d'édifices religieux du Moyen-Age qualifiés de « mineurs » au travers de l'étude de la chapelle Saint-Étienne de Guer. Pour ce faire, un protocole d'étude a été élaboré et mis en place afin de rendre systématique la prise d'informations nécessaires à une étude statistique des maçonneries. Une étude pétrographique sur lames minces des matériaux a été réalisée pour vérifier une origine locale des matériaux employés dans l'édifice.

L'analyse statistique faite à partir de bases de données exploitées sous un logiciel SIG a permis une avancée dans les réflexions en mettant en évidence de nettes différences entre les phases de construction. Les caractéristiques discriminantes des maçonneries ont été élaborées à partir de plusieurs critères comme les longueurs, le rapport longueur/largeur et l'écart résiduel. Les données conjointes de l'étude du bâti, de l'exploitation des données spatiales et de l'étude pétrographique ont permises d'élaborer un protocole innovant d'analyse des édifices religieux qui permet d'apporter un regard nouveau sur les aspects de l'économie de chantier.

Mots-clé : analyse statistique, archéologie du bâti, chapelle, Moyen-Age, Analyse pétrographique, Bretagne, SIG

Key words : statistic analysis, archaeology of framework, chapel, Middle-Age, Britain

Dans un contexte de développement des recherches archéologiques préférant les habitats et les activités artisanales des populations aux grands châteaux seigneuriaux, force est de constater que très peu d'études se sont penchées sur les édifices religieux qualifiés de mineurs, de par leur taille et leur position hiérarchique au sein de l'Église pour ce concentrer sur de grands ensembles (BARDEL, 1991, DECENEUX, 1994, 1996, 1998, GRAND, 1958, GUIGON, 1978, 1987, 1998, LEFEBVRE, 2004, PRIGENT, 1989, 1996, 2005, SAPIN,2000). Or, ce sont eux qui se trouvaient au centre de la vie quotidienne de la population et qui ont monopolisé le plus d'ouvriers. Paradoxalement, ils sont les moins étudiés et les plus sensibles aux intempéries et au temps.

Aussi, pour cette recherche une question principale s'est posée : quelle économie de chantier pour ces édifices dits « mineurs »? Cette question recouvre à la fois l'approvisionnement du chantier en matériaux ainsi que les traitements appliqués à ces derniers avant leur mise en œuvre dans les maçonneries. Au sein de cette approche, une autre interrogation peut-être posée : une évolution des traitements des matériaux est-elle perceptible au fil du temps? Et si oui, dans quelle mesure? Comment se traduisent-ils dans la structure?

Pour tenter de répondre à ces questions plusieurs approches ont été mises en œuvre pour l'étude de la chapelle Saint-Étienne de Guer. En effet, une étude statistique des appareils a été effectuée. Ce type d'étude offre la possibilité d'aller plus loin et de compléter l'étude archéologique de bâti faite en 2008-2009, qui a permit une détermination des phases de construction de l'édifice (MERDY, 2009). Couplée à cette étude statistique, des observations pétrographiques ont été menées dans le but de tenter des rapprochements avec la géologie locale.

2.1 Objet d'étude

2.1.1 La chapelle Saint-Étienne

Situé à environ 3 km à l'ouest de Guer, le prieuré Saint-Étienne est implanté sur un plateau schisteux dominant la vallée de l'Oyon. Il se compose de quatre bâtiments organisés autour d'une cour où affleure le substrat schisteux (figure 1). Ces édifices ont été élaborés avec les mêmes matériaux principaux : du grès, du schiste, du poudingue et de la terre cuite. La chapelle, orientée (chevet oriental en direction de l'Est), mesure environ 20 m de long pour 7 m de large et 4 à 5 m de hauteur sur les gouttereaux et 7 à 8,50 m pour les pignons. Elle se caractérise par un remploi de terre cuite gallo-romaine dans les parties basses des murs nord et est sous la forme d'un appareil régulier comprenant également des moellons de grès. Dans la partie sommitale du pignon oriental, la terre cuite est également utilisée pour la mise en œuvre d'un décor composé de quatre rangées de triangles élaborés à partir de briques disposées en bâtière. Les autres murs sont principalement constitués de plaques de schiste ainsi que de poudingue, de grès, de kératophyre et de granite répartis symétriquement sur les murs nord, sud et est, huit contreforts plats permettent un raidissement de la structure et la maintiennent.

L'entrée dans l'édifice se fait par deux portes positionnées respectivement dans la moitié ouest de la chapelle sur les murs nord et sud. L'éclairage est assuré par trois grandes baies situées dans la partie orientale du bâtiment dans les murs sud et nord ainsi que par un jour présent dans le mur nord. Sur ce même mur d'autres jours sont encore visibles mais ont été condamnés par une accumulation de plaquettes de schiste, tout comme celui présent au centre du mur est. L'ébrasement interne de ce dernier est encore visible et sert de niche au-dessus de l'autel.

Les parements internes sont majoritairement recouverts d'enduits, peints ou non. Ainsi

dans la partie orientale de la chapelle, c'est un programme comprenant plusieurs scènes religieuses qui est observable (annexe. 1).

Mis à part l'autel, le reste du mobilier est un retable en bois du XVIIe siècle et deux statues polychromes en bois : Sainte Apolline et Saint Étienne.

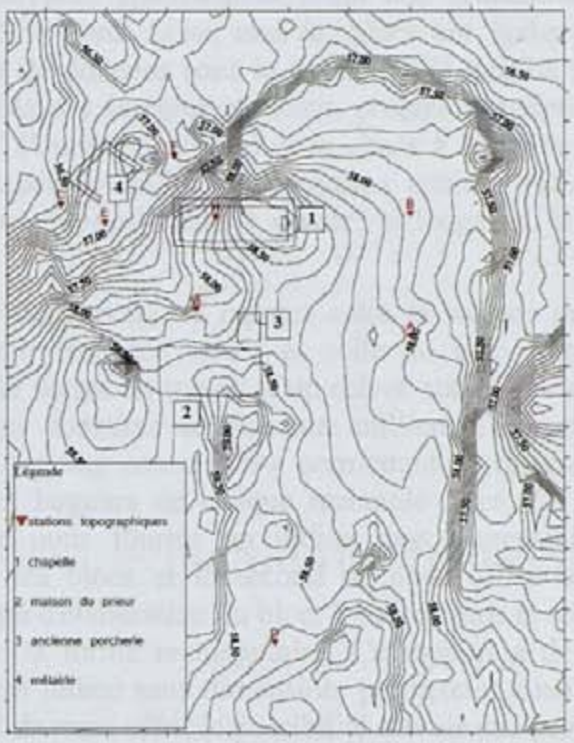


Figure 15 : relevé topographique du site de Saint-Étienne. (E. Merdy – J-C. Oillic).

2.1.2 Son environnement géologique

La zone d'étude comprend deux ensembles lithologiques : l'Ellipse sédimentaire de Réminac au Sud et le substrat cristallophyllien de Brocéliande au Nord. Majoritairement schisteux, ce substrat se situe sur l'un des synclinaux du sud Bretagne et présente ainsi des faciès analogues à ceux identifiés au sud du bassin de Rennes (QUETE, 1975). Ainsi, il est possible de rencontrer, dans un périmètre de 3 à 5 km autour du site des formations affleurantes offrant des matériaux tels que les dalles pourprées, le grès Armoricain, le grès de Courouët, les poudingues de Gourin et de Montfort et des occurrences kératophyriques. L'édifice étudié comporte plusieurs éléments de granite or, on constate une absence notable de formations granitiques dans la zone d'étude.

2.2 *Méthodes*

2.2.1 L'analyse statistique

Suite à un relevé photographique, chacun des blocs a été modélisé sur ordinateur. Les murs ont ensuite été référencés spatialement selon une projection orthonormée, où le X correspond à l'est et le Z au nord. Ainsi, tous les blocs ont également été géoréférencés et enregistrés dans une base de données sous le logiciel SIG ArcGis 9.2. La base de données constituée, il a été possible d'y intégrer plusieurs critères descriptifs comme la nature des matériaux ainsi que l'UC (Unité Construite) et la phase à laquelle ils pouvaient appartenir. Afin de mener à bien l'étude envisagée, de nouveaux critères statistiques et dimensionnels sont venus s'ajouter à ceux citer ci-dessus à savoir : la longueur, la largeur, le périmètre, la surface et l'écart résiduel.

Ce dernier critère correspond au rapport entre la surface du rectangle le plus petit pouvant contenir la pierre dans son entier et celle du bloc relevé sur le terrain. Pour automatiser et optimiser le temps de travail d'un relevé statistique qui peut s'avérer long et fastidieux pour un ouvrage constitué de plusieurs milliers d'éléments modélisés, il y a eu recours à l'application *« bouding containers »* permettant de restituer systématiquement les plus grandes longueurs et largeurs de chaque rectangle tracé. Ce rapport a deux intérêts majeurs : le premier de nous fournir un indice sans dimension, permettant ainsi des comparaisons entre tous les blocs et le second de nous offrir la possibilité d'avoir une première approche du degré d'élaboration du bloc. En effet, plus le résultat sera proche de 1 et plus bloc sera proche de la forme rectangulaire. Ce rapport a deux intérêts majeurs : le premier de nous fournir un indice sans dimension, permettant ainsi des comparaisons entre tous les blocs et le second de nous offrir la possibilité d'avoir une première approche du degré d'élaboration du bloc. En effet, plus le résultat sera proche de 1 et plus bloc sera proche de la forme rectangulaire.

D'autres comparaisons ont pu être faites à partir des données obtenues comme le rapport des longueurs sur les largeurs. Il permet de définir le degré d'allongement des pierres car si L/l=1 alors le bloc sera le plus proche de la forme carré, sous-entendant, dans certains cas, un travail du matériau plus poussé et plus L/l est grand et plus le bloc sera allongé.

Trouver la meilleure représentation des résultats possible a nécessité l'utilisation de plusieurs méthodes. La première, « classique », consiste à montrer les données sur des graphes à colonnes ou nuages de points comme a pu le faire Daniel Prigent (PRIGENT, 1989, 1996) et la seconde se base sur l'utilisation d'une « carte » de répartition des données à l'aide du logiciel ArcGis 9.2.

La méthode « classique » s'est vite révélée insuffisante. En effet, plusieurs tris ont tout d'abord été effectués afin de dégager les moyennes (longueurs, largeurs, rapport longueur sur largeur, écart résiduel), les écart-types et ce en fonction des phases, des murs, de la nature des matériaux et, dans certains cas, de leur position dans la maçonnerie (angle, ouverture). Des comparaisons ont été faites sur les longueurs pour des matériaux aussi différents que les briques et le poudingue. Or, aucune partition, ou répartition, n'a pu être exploitée. Il en a été de même lorsque le critère « phase » a été intégré. Tous les nuages de points présentent les mêmes caractéristiques et évolutions

Pour palier le manque d'informations complémentaires aux données initiales du relevé de bâti, des classes ont été déterminées de manière arbitraire et un tri manuel des blocs a été effectué en prenant en compte les critères

« longueur », « le rapport longueur sur largeur » en fonction de la phase à laquelle ils appartenaient pour chacun des murs. Là également, la représentation graphique s'est avérée inexploitable : pour un même matériau, à phases différentes, les mêmes courbes ressortes et montrent une forte proportion de blocs compris entre X et Xcm. De même, une comparaison entre deux phases d'un seul mur ne montre pas de variations majeures dans la répartition des longueurs des matériaux alors que visuellement, il est possible de clairement discriminer des différences.

À la vue des graphiques obtenus ce type de représentation a été écarté au profit d'une autre visualisation des résultats.

La seconde méthode basée sur le principe de «relevé» de répartition des effectifs s'est avérée plus efficace. En effet, il a été possible de représenter directement sur les murs les données pour les critères « longueurs », « rapport longueur-largeur » et « écart résiduel » pour chacun des murs. Les classes déterminées ont été effectuées à partir de deux critères déjà présents dans le logiciel : moyenne - écart-type et l'indice naturel de Jenks. Le premier a l'avantage de faire des classes à partir des données présentent dans la base et de garder un écart constant égal à deux fois l'écart-type. Concernant l'indice de Jenks, il s'agit d'un algorithme aboutissant à la réduction de la variance inter-classe et maximisation de la variance intra-classe. Il permet de distinguer, suivant le nombre de classes déterminées, celles contenant les individus les plus homogènes et les plus distinctes les unes des autres.

Permettant ainsi de produire des ensembles cohérents en fonctions des critères choisis.

Indice de Jenks = (somme des écarts de chaque classe / nombre de classes

Cet indice ne permettant pas de faire des comparaisons entre les murs sans vérifications préalables il a été décidé de prendre en compte la moyenne et l'écart-type, calculés à partir de l'ensemble des 27 000 pierres des quatre murs et d'appliquer les classes obtenues à chacun des murs. Aucune différence n'ayant été trouvée entre les deux représentations, les figurations présentées ici se basent sur les données issues de chacun des murs.

2.2.2 L'étude pétrographique

Vingt-trois échantillons, de quelques grammes chacun à environ 2 kg, ont été prélevés sur les murs de la chapelle. Six d'entre-eux ont été fait sous forme de carotte, d'environ 3cm de diamètre (annexe 3) à l'aide d'un carottier monté sur une perforatrice. Les autres ont été effectués manuellement à l'aide d'un marteau de géologue.

Deux méthodes d'observation ont été utilisées pour obtenir une caractérisation pétrographique des roches. L'examen macroscopique a permis de faire une description de la nature et des proportions des différents constituants des éléments lithiques. Sur les lames minces une observation au microscope polarisant a permis la détermination des minéraux et des textures pétrographiques.

2.3 4. Résultats

2.3.1 Les statistiques

2.3.1.1Le mur oriental

Les observations menées sur le mur oriental ont permis de mettre en évidence six ensembles (figure 2).

Les écarts résiduels (annexe 4) délimitent deux ensembles : le bas du mur et le sommet du pignon. Tous deux ont été élaborés avec un appareil de briques et de moellons de grès, de schiste et de kératophyre.

Grâce au rapport longueur-largeur (annexe 5) il est possible de distinguer quatre assises de longues plaques de schistes disposées à intervalles réguliers de 50–60 cm de bas en haut. Traversant toute la largeur du mur, elles se situent aux mêmes niveaux que les trous de boulins. À la base du sommet du pignon, une concentration de trois à quatre assises de schiste est visible et occupe également la largeur du mur.

Un autre ensemble, la partie centrale du mur, située entre l'appareil régulier du bas du mur et les assises de plaques de schiste, se dégage en mettant en évidence des matériaux peu étirés, voire épais.

La partie sommitale du pignon oriental se compose de deux séries distinctes. En effet, la série numéro cinq (Figure 16) longe l'appareil de moellons comprenant le décor et prend fin au niveau de l'ensemble d'assises de plaques de schiste. Juste sous la pente du toit la sixième et dernière série comporte de petits éléments se cantonnant à cette partie du mur.

Une fois ces données croisées aux observations menées à l'occasion de l'étude de bâti, il est possible de confirmer les découpages effectués à ce moment (MERDY, 2009, annexe 6). Ainsi, les « sous-ensembles » un à quatre appartiennent à une seule et unique phase datant de la fin du Xe-début du XIe siècle. Cette partie du bâtiment se compose de trois appareils différents : de bas en haut, un appareil moellonné, que l'on peut qualifier de régulier, un deuxième comprenant des matériaux épais et grossièrement dégrossis, puis un ensemble d'assises de plaques de schiste dans lequel se trouve un groupement de plaques plus étirées que les autres situées à la base du sommet du pignon primitif. Et enfin, un second appareil régulier comprenant un décor fait de briques et de tuile disposées en bâtière pour former quatre rangées de triangles.

Sur le plan structurel, cette première phase de construction est régulièrement rythmée par des assises de schiste correspondant aux alignements de trous de boulins. Leur espacement régulier ainsi que leur disposition et leur relation avec les trous de boulins laissent penser à des assises de réglages mises en places lors du rehaussement des échafaudages au fur et à mesure de l'édification.

La concentration de plaques de schiste, localisée à la base du sommet du pignon, correspond également à un niveau de réglage avant la mise en place de l'appareil régulier et du décor, dans lequel quelques assises de réglage sont également perceptibles.

Pour les matériaux en eux-mêmes et les traitements qui ont pu leur être appliqués, il est possible de voir de nettes différences. Ainsi, le grès a été préférentiellement taillé pour lui donner une forme la plus proche possible de formes géométriques telles que le carré et le

rectangle. Le schiste, quant à lui, se rencontre principalement sous forme de plaques allongées. Ces différences de taille sont sans doute dues à la nature du matériau : le grès étant à grain fin et non friable, il permet un travail plus poussé que le schiste qui se débite surtout sous forme de plaques, déjà adaptées à la construction, comme celles que l'on peut voir dans la maçonnerie. Cette dernière observation peut s'appliquer à l'ensemble des murs.

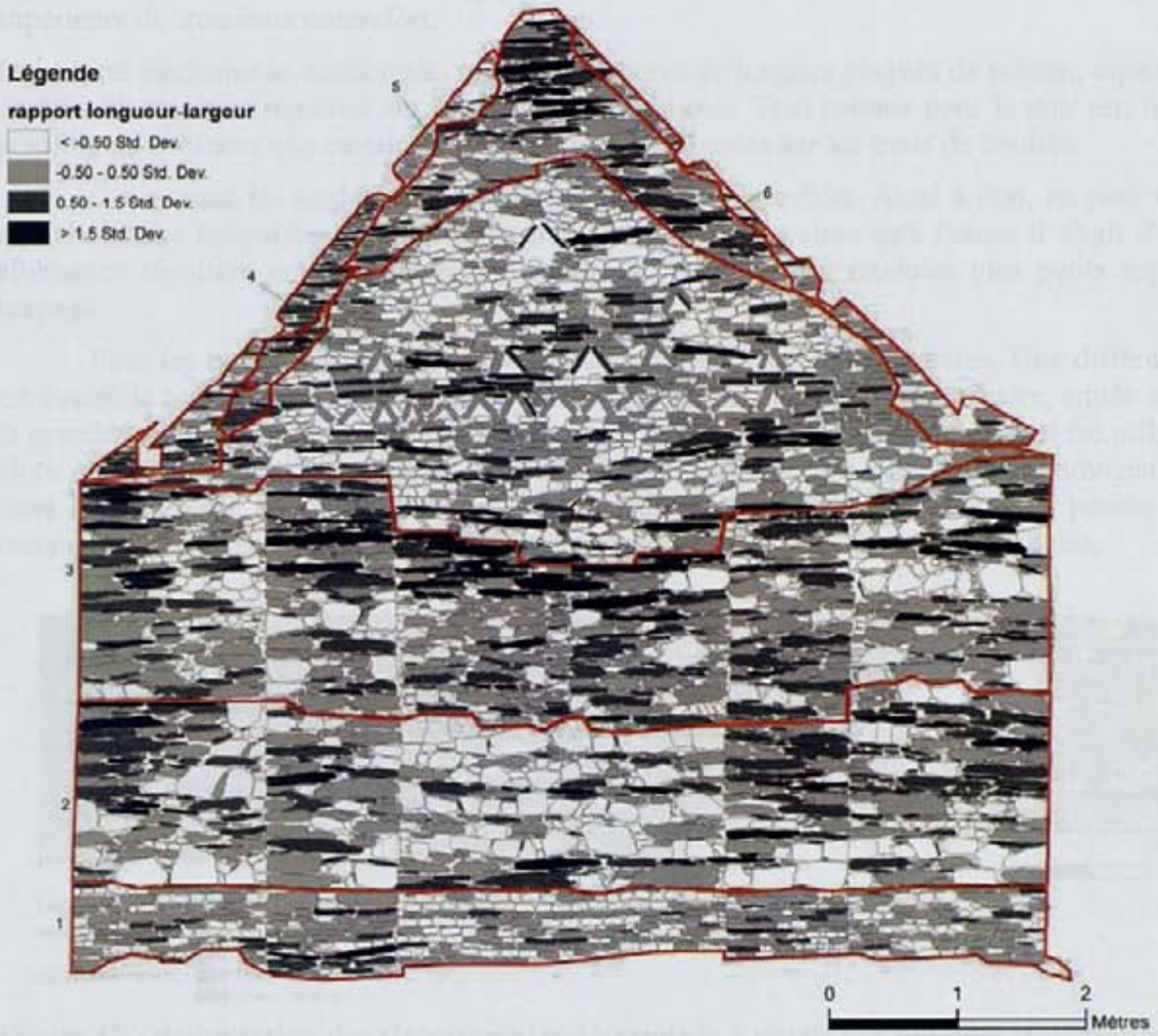


Figure 16 : délimitation des six ensembles déterminés à partir des données statistiques (E. Merdy)

2.3.1.24.1.2. Le mur sud

Trois ensembles peuvent être distingués lorsque l'on observe les maçonneries (Figure 17). Ainsi, le premier se situe dans le bas de l'angle oriental du mur et se compose d'un appareil que l'on peut qualifier de régulier, analogue à celui présenté sur le pignon est. En effet, il a été élaboré avec des briques et des moellons de grès ainsi que de kératophyre. Contrairement au mur est, ici il est cantonné à cette partie du mur et ne s'étend que sur environ 2m de long pour moins d'1m de haut.

Au-dessus de cet appareil, se trouve un autre ensemble comprenant des éléments de tailles et de formes diverses. Il se poursuit pour occuper la moitié inférieure du mur dans la partie orientale de ce dernier, située entre le premier et le troisième contrefort. En effet, il est

possible d'observer une concentration de matériaux de grande taille et de natures diverses (grès, poudingue...) dans cette partie du mur.

Juste au-dessus, la maçonnerie change radicalement pour ne présenter qu'un appareil assisé de longues plaques de schiste situées entre les deux grandes baies du mur.

La partie ouest du mur offre une maçonnerie homogène par l'emploi de modules compris entre 0,10 m et 0,34 m de long. Ce type de mise en œuvre semble correspondre avec l'ensemble observé entre les deux grandes baies de ce même mur ainsi qu'avec la partie supérieure du troisième contrefort.

Dans cette maçonnerie occidentale, une série d'assises de longues plaques de schiste, espacées de 50 à 70 cm, sont réparties sur toute la hauteur du mur. Tout comme pour le mur est, il est possible de constater que certaines d'entre elles sont alignées sur les trous de boulins.

Concernant les angles, une distinction claire peut-être faite. Ainsi à l'est, on peut voir une alternance irrégulière de matériaux plus ou moins longs alors qu'à l'ouest il s'agit d'une alternance régulière entre de longues plaques de schiste et des modules plus petits appelé harpage.

Pour les ouvertures, il s'agit essentiellement d'éléments rectangulaires. Une différence est toutefois notable pour les encadrements des portes. En effet, pour la première, située sous la grande baie, on peut voir que des matériaux de tailles et de natures diverses ont été utilisés alors que pour la seconde, utilisée actuellement, on constate une plus grande homogénéité dans le traitement du schiste mis en œuvre pour lui donner la forme la plus proche du rectangle. Ce type de traitement est également observable pour les deux grandes baies.

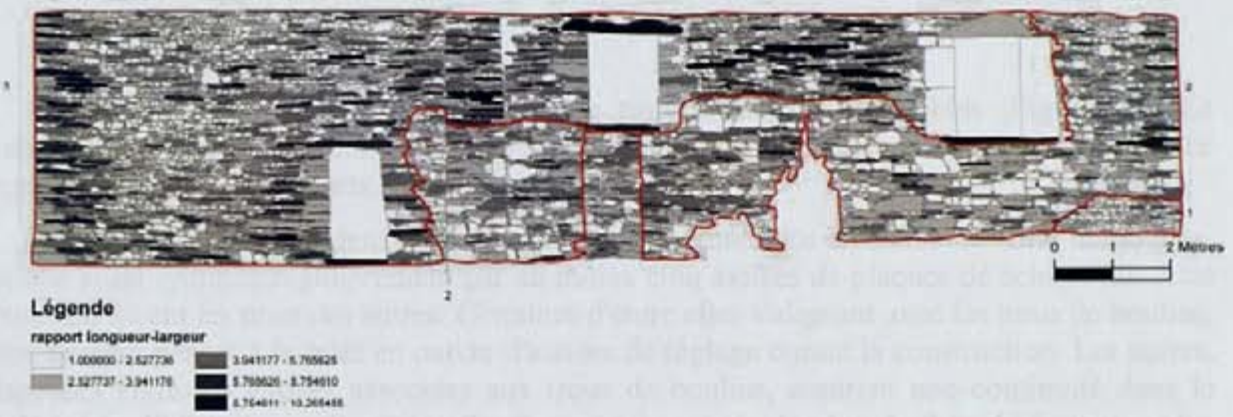


Figure 17 : délimitation des six ensembles déterminés à partir des données statistiques (E. Merdy).

En couplant ces données aux observations sur le bâti, il est possible de confirmer certains découpages obtenus lors de l'étude de bâti ainsi que de réunir certains ensembles en désignant chacun d'eux comme « sous-ensemble ». Ainsi deux grandes parties sont visibles sur ce mur (annexe 9). La première phase, s'étendant de l'angle est à la partie basse du troisième contrefort, correspond à la première phase de construction, similaire à celle de la première phase du mur est. À savoir, un premier appareil régulier fait de briques et de moellons de divers matériaux, un appareil plus grossier constitué de blocs massifs et un troisième fait de matériaux taillés en fines plaques.

La seconde phase, comprend le haut du troisième contrefort et la maçonnerie présente jusqu'à l'angle ouest. Au même titre que les assises de plaques de schiste espacées régulièrement identifiées sur le mur est, celles présentent dans cette partie de l'édifice semblent avoir eu le même rôle de réglage. En effet, disposées régulièrement et

correspondant, pour certaines d'entre elles, aux alignements des trous de boulins, il semble qu'elles aient été mises en œuvre au fur et à mesure du chantier lors de l'installation progressive des échafaudages.

Concernant cette phase de construction, les analyses statistiques vont dans le sens d'une contemporanéité entre les deux grandes baies présentent dans la partie orientale du mur et la porte d'entrée située dans la partie ouest. En effet, les blocs utilisés pour la porte, liée à la maçonnerie ouest, et ceux mis en œuvre pour les baies possèdent des tailles et des mises en forme similaires.

À propos de la maçonnerie séparant ces deux baies, l'analyse statistique a montré que les longueurs des assises de schiste utilisées sont plus proches de celles mises en œuvre lors de la deuxième phase de construction que de celles de la première phase (figure 3). Ceci amène à dire que la partie supérieure du mur a pu être entièrement détruite (de manière accidentelle ou non) et qu'elle aurait été remontée lors de la phase d'agrandissement du bâtiment et de la mise en place des grandes baies (annexe 10).

Toutefois, les éléments de calage présents entre les baies et cette partie de la maçonnerie peuvent permettre de proposer une seconde hypothèse, retenue lors de l'analyse de bâti : un percement du mur pour l'installation des deux grandes baies.

Sur le plan structurel, la première hypothèse semble plus probable. En effet, les éléments de calage auraient pu être évités lors d'une reconstruction totale de cette partie du mur.

2.3.1.3 Le mur ouest

Concernant le mur ouest on distingue trois principaux ensembles (Figure 18). Le premier d'entre eux correspond aux angles sud et nord qui se caractérisent par une alternance régulière de longs et de courts éléments en schiste.

La maçonnerie, du deuxième ensemble, comprenant des éléments de taille homogène, est elle aussi rythmée régulièrement par au moins cinq assises de plaques de schiste distantes d'environ 80 cm les unes des autres. Certaines d'entre elles s'alignant avec les trous de boulins, elles laissent penser à la mise en œuvre d'assises de réglage durant la construction. Les autres, disposées entre les assises associées aux trous de boulins, assurent une continuité dans le réglage régulier de la maçonnerie afin d'assurer à ce mur de plus de 8 m de haut une plus grande stabilité.

Le troisième (Figure 18) et dernier ensemble se situe sous la pente du toit et correspond à de petits éléments de grès et de schiste mis en œuvre. Analogues à ceux identifiés sous la pente du toit du pignon est, il est possible de penser à une reprise de cette partie des maçonneries lors d'une troisième phase de construction/modification ayant portée sur la toiture.

Ces observations menées, il est possible de constater que ce mur n'a subi aucune modification hormis la reprise sous la pente du toit.

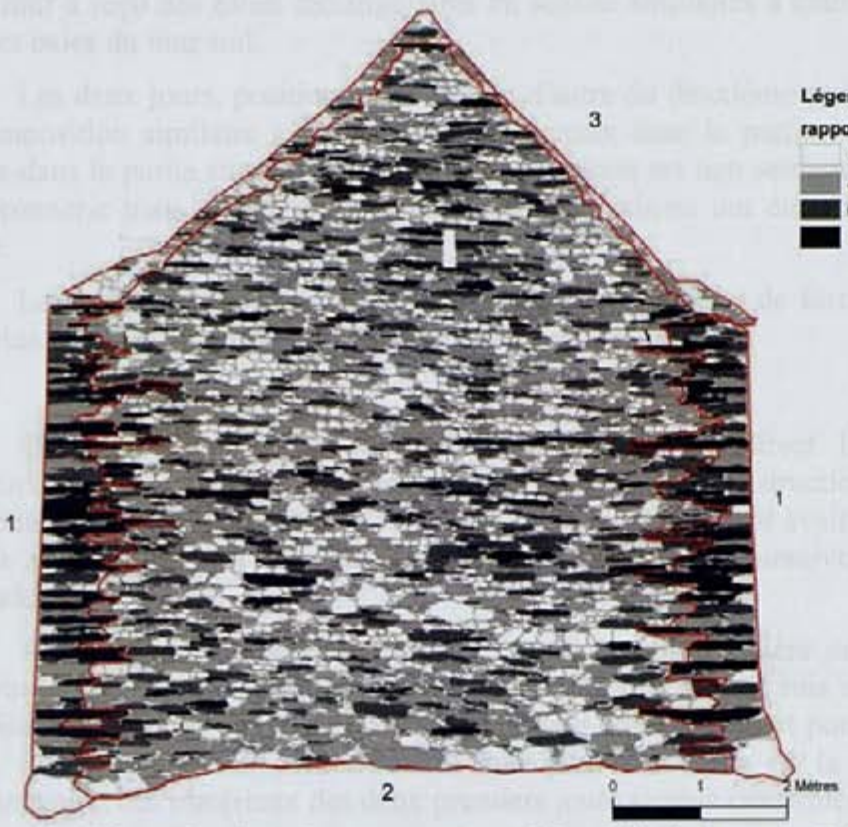


Figure 18 : détermination des quatre ensembles définis à partir de l'analyse statistique (E. Merdy).

2.3.1.4Le mur nord

À l'image du mur sud, le mur nord présente plusieurs ensembles (figure.5). Le premier, situé dans la partie basse du mur, est un appareil régulier de moellons et de briques s'étendant de l'angle est à la porte d'entrée.

Le deuxième est un appareil comprenant à la fois des rangées de gros blocs grossièrement taillés et des matériaux plus petits. Il possède la même étendue que le premier ensemble et se limite à la moitié basse du mur.

Ainsi, c'est un appareil assisé de plaques de schiste qui est installé directement sur le premier ensemble défini. L'analyse statistique suggère que cet appareil, en plus d'occuper la moitié supérieure de la partie orientale du mur, se poursuit sur toute la partie ouest de la surface murale.

Comme pour les murs sud et ouest, il est possible de voir dans cette partie du mur six assises de plaques de schiste régulièrement espacées pour occuper toute la hauteur de la maçonnerie. Les trous de boulin n'apparaissant pas dans cette partie du mur, il n'est pas possible de dire s'il y a, là également, un rapport entre ces deux éléments de la construction.

Les angles est et ouest sont bien distincts de par leur mis en œuvre. En effet, l'angle oriental est constitué d'éléments dont la forme est majoritairement proche rectangle (Figure 19) alors que l'angle ouest est essentiellement construit avec de longues dalles de schistes allongées. Pour le premier, aucune organisation particulière n'est décelable alors que pour le second on peut constater que cinq à six plaques correspondent aux assises régulièrement espacées citées précédemment.

Concernant les ouvertures, des traitements différents sont visibles. Ainsi la grande baie

de ce mur a reçu des blocs rectangulaires en schiste similaires à ceux utilisés pour l'une des grandes baies du mur sud.

Les deux jours, positionnés de part et d'autre du deuxième contrefort, sont de taille et de composition similaire avec des matériaux épais dans la partie basse et des plaques de schiste dans la partie supérieure alors que le troisième est non seulement situé plus haut dans la maçonnerie mais seules de longues plaques de schiste ont été utilisées pour sa mise en œuvre.

La porte, quant à elle, a reçu des éléments de taille et de forme similaire, hormis un bloc plus épais que les autres situé au milieu du piédroit droit.

Ces résultats, couplés aux observations du bâti, offrent la possibilité d'émettre plusieurs hypothèses quant à la répartition des phases de construction. En effet, lors d'une précédente analyse du bâti (MERDY, 2009) un phasage différent avait été retenu . Or, comme pour le mur sud, on peut voir que l'appareil ouest semble se poursuivre jusqu'à la grande baie orientale.

Aussi deux hypothèses peuvent être proposées:la première est que pour des raisons d'approvisionnement du chantier des éléments plus fins ont été mis en œuvre dans la partie supérieure du mur, et ce dès la première phase de construction et pour l'ensemble des murs. Ainsi, il y aurait eu un percement du mur pour l'insertion de la baie au XVIIe siècle. L'organisation des matériaux des deux premiers jours semble confirmer cette hypothèse.

La seconde, est que pour des raisons pratiques, la partie supérieure du mur a été détruite (volontairement ou non) et remontée par la suite en même temps que la baie et en reformant les deux jours en question

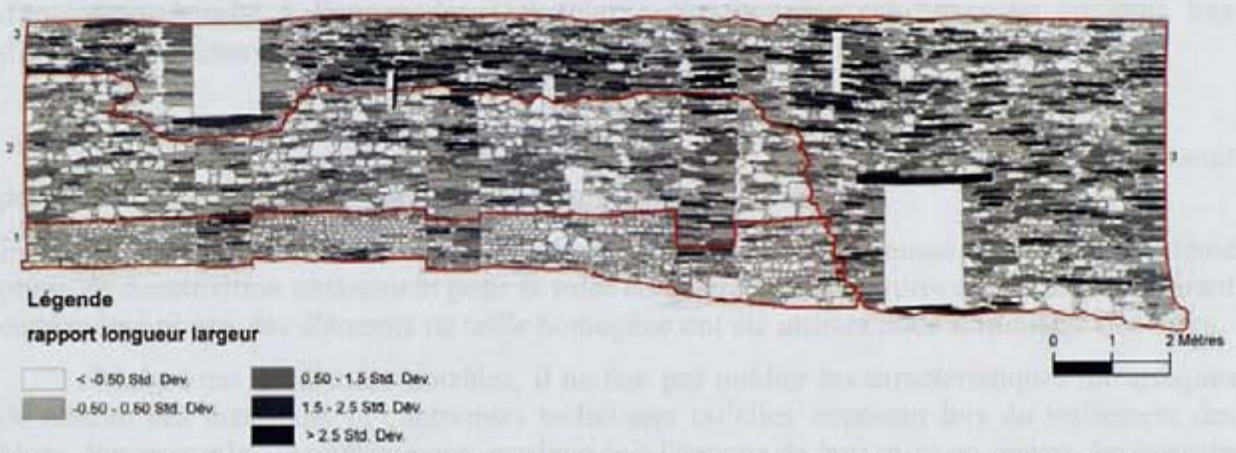


Figure 19 : détermination des trois ensembles définis à partir de l'analyse statistique (E. Merdy)

2.3.1.5 Discussion des données statistiques

Si l'analyse statistique a permis de confirmer la plupart des hypothèses concernant la délimitation des phases de construction, elle a également permis d'en proposer de nouvelles.

Ainsi, au lieu d'avoir, lors de la seconde phase, un allongement de la chapelle couplé à un percement de trois grandes baies dans la partie orientale de l'édifice, pour la mise en valeur du chœur et du retable, il y aurait eu un allongement de la structure avec une reconstruction des partie supérieures des murs sud et nord en même temps que la mise en place des grandes baies.

Toutefois, plusieurs éléments viennent contredire, ou mettre un doute sur le déroulement supposé des évènements. En effet, le pignon oriental a montré une organisation similaire de ses matériaux à celle des murs sud et nord à savoir un appareil régulier de moellons et de briques, une partie médiane faite de matériaux de grande taille et grossièrement taillés et enfin un appareil assisé de plaques de schiste. Or aucun remaniement n'a été décelé sur ce mur.

De plus, des éléments de calage ont été mis en évidence sur les baies du mur sud ce qui semble confirmer une mise en place postérieure des baies par rapport à la maçonnerie.

Si la seconde hypothèse semble plus probable, seule une étude poussée des mortiers, encore conservés dans les murs, pourrait nous indiquer laquelle des deux est la bonne ou la plus plausible. En effet, à partir d'une comparaison de texture et d'une observation des relations stratigraphiques entre les mortiers, il serait possible de déterminer les relations d'antéro-postériorité à l'image des U.S (Unités Stratigraphiques) prises en comptes lors d'études de sédiments.

Concernant le traitement des matériaux il est évident que des différences sont perceptibles entre les deux grandes phases mises en évidence.

En effet, il apparaît que le schiste a bénéficié d'un travail plus poussé lors de la deuxième phase de construction notamment pour sa mise en œuvre aux ouvertures et aux angles. Durant cette même phase, des éléments de taille homogène ont été utilisés pour le montage des murs.

Malgré ces différences notables, il ne faut pas oublier les caractéristiques intrinsèques de chacun des matériaux et contraintes techniques qu'elles imposent lors du traitement des blocs. Par exemple, on constate que, quelque soit l'époque de leur mise en œuvre, les schistes ont été majoritairement laissés sous forme de plaques ou de plaquettes alors que le grès a pu être taillé soit sous forme de moellon soit taillé sous forme de plaque.

Les poudingues, quant à eux, n'ont pu bénéficier d'un travail élaboré en raison de leur composition de galets de quartz plus ou moins riche restreignant tout travail poussé du matériau.

Les briques, quant à elles, ont une longueur moyenne de 0,12 m à 0,14 m et une largeur moyenne de 0,045 m à 0,088 m et cela quelque soit la phase à laquelle elles appartiennent. Ces résultats viennent confirmer l'hypothèse d'une fabrication de toutes les briques à un moment donné.

La saisie des données directement sous un logiciel SIG, dès la reprise des murs, s'est révélée très efficace pour la suite du travail envisagé pour cette étude. En effet, sur le plan technique elle offre la possibilité de modéliser chaque bloc et ainsi constituer une base de données recensant les caractéristiques essentielles de chaque élément de construction : leur nature, leur longueur, leur largeur, leur surface, leur périmètre. Cette mise en œuvre a pour avantages un faible investissement financier, humain et de temps d'intervention et de traitement des relevés.

A partir des critères cités précédemment, il a été possible d'aller plus loin dans la réflexion notamment lorsqu'il a fallu aborder la question du degré d'élaboration des blocs grâce à de nouveaux rapports tels que longueur/largeur et écart résiduel. Sans aller jusqu'à affirmer que la méthode nous fournit directement les réponses à toutes nos questions portant sur le bâti et l'économie de chantier, elle offre la possibilité de faire une première approche globale et d'obtenir des résultats cohérents à condition de prendre en compte, au préalable, les paramètres les plus adaptés à la problématique envisagée. De plus, à l'instar des travaux réalisés par Daniel Prigent, cette méthode permet d'envisager des hypothèses relatives à détermination et délimitation des phases de construction.

Cette approche devient novatrice quand elle est intégrée à des études de bâti réalisées sur chaque bâtiment. En effet, il a été constaté que certains critères ont permis de mettre en évidence des ensembles particuliers tels que les angles ou les ouvertures insoupçonnés par des études classiques.

L'étude de terrain demeurant essentielle pour l'analyse des maçonneries, le choix des critères de description dans la base de données, et la vérification des hypothèses suggérées par l'interprétation spatiale des données, sur les phases de construction de l'édifice s'avèrent nécessaires avant d'aller plus loin dans l'analyse notamment pour certaines interprétations.

Les résultats de l'application des traitements statistiques, associés à un logiciel SIG, sur un édifice religieux montre l'utilité d'un tel outil et fournit une aide supplémentaire à l'interprétation des phases de construction et à la compréhension de l'économie de chantier pour des édifices qualifiés de « mineurs » et généralement délaissés par la recherche.

Les prochains objectifs sont l'automatisation du traitement de l'imagerie sur support informatique et son application à un corpus d'édifices plus large en vue d'une étude plus systématique de l'évolution de l'économie de chantier sur une région donnée.

2.3.2 L'analyse pétrographique

2.3.2.1 Résultats

La chapelle Saint-Étienne est constituée de matériaux de natures diverses dont les carrières d'extraction demeurent encore inconnues. L'étude pétrographique sur lames minces a permis une observation plus précise et de réaliser des attributions lithologiques avec les descriptions des formations caractérisées par Yves Quété au cours de sa thèse (QUETE, 1975). De plus, il a été possible d'effectuer des comparaisons avec la collection de référence de lames minces issue de ses travaux ayant servi également à l'élaboration de la carte géologique de Guer. (Numéro de notice 352).

Les résultats de ces comparaisons sont les suivants.

Les échantillons 1 et 2, montrent des grès dont le faciès est proche de celui de la formation de la Vollais, distante d'environ 4km du site. Ils se caractérisent par la présence de fragments lithiques fins (microquartzites et siltstones) et des grains de quartz, dont la taille maximale n'excède pas 500 µm, dans une matrice essentiellement quartzeuse.

Les lames 4 et 8 ont été identifiées comme appartenant à la formation du grès de Courouët selon les critères suivants: une couleur rouge, ou pourprée, due à la présence de fer dans le ciment détourant les grains de quartz anguleux et émoussés et une granulométrie fine avec des grains inférieurs à 100µm.

Les échantillons 10 et 22 présentent le faciès microconglomératique du poudingue de Montfort présent sur tout le pourtour de l'Ellipse de Réminiac. Il se caractérise notamment par une matrice schisteuse comprenant des fragments lithiques de grès.

Les lames 18 et 22, quant à elles, sont des échantillons de poudingue de Montfort se caractérisant par une matrice gréseuse, plus ou moins abondante selon leur localisation, comprenant des galets de quartz arrondis et étirés. Visuellement il est particulièrement identifiable par sa couleur rouge à pourpre due à la présence d'hématite dans la matrice.

L'échantillon 17 se distingue des autres conglomérats par une prédominance de la couleur verte de sa matrice. Cette dernière comprend des galets polycristallins de quartz ainsi que des minéraux accessoires tels que la biotite et la muscovite. Ces éléments permettent de le rapprocher du poudingue de Gourin dont l'un des affleurements se trouvent à Saint-Nicolas, au sud-est du site.

L'analyse de la lame 12 montre un schiste appartenant à la formation du Briovérien mais ne nous permets pas d'aller plus loin dans l'attribution géographique, ici, en raison de l'homogénéité de la structure des schistes à l'échelle de la Bretagne méridionale (QUETE, 1975).

Les schistes pourpres visibles dans les murs sont probablement issus des formations des dalles pourprées comme celles de la Ville Hue ou celles situées à moins d'un km de la formation de la Vollais.

Concernant les granites (échantillons 6, 11, 13, 14 et 15) mis en évidence lors de l'observation des maçonneries, ils semblent issus d'un remploi aussi leurs descriptions ont été intégrées aux annexe. Les observations ont permit de les rapprocher de ceux présents dans le sud Bretagne avec leur couleur blanche ainsi que les éléments les composants.

2.3.2.2 Discussion

Cette approche des matériaux permet de confirmer l'hypothèse selon laquelle les matériaux sont clairement d'origine locale avec une distance maximale de 5 km entre le site et les lieux d'extraction (MERDY, 2009). Concernant les carrières anciennes, aucun texte, ou archives, ne nous sont parvenus pour la période du Moyen-Age. Une mention est toutefois à prendre en compte puisqu'il s'agit d'une carrière de schiste ardoisier exploitée depuis le XIIIe siècle (ORHAN, 2004). Dans les comptes du prieuré figure une mention de vente de schiste ardoisier ce qui laisse supposer que les ouvriers pouvaient directement se servir de ce matériau, notamment pour la couverture.

2.4 Conclusion

Comme il a pu être constaté, la mise en place d'un protocole d'étude utilisant un logiciel SIG pour une approche du bâti s'est avérée très utile non seulement pour le relevé de bâti conventionnel mais également pour l'approfondissement du travail. Ainsi, il a été non seulement possible de rendre l'analyse statistique plus aisée, en évitant les mesures longues et fastidieuses des blocs, mais aussi de créer une représentation visuelle des résultats directement sur les murs, facilitant leur lecture et leur interprétation. De plus, grâce à la création d'une base de données en liaison avec le relevé, il est possible d'intégrer des critères (longueur, largeur, …) et des rapports (longueur/largeur, …) permettant de faire une analyse plus poussée des maçonneries.

Cet outil d'interprétation est à exploiter en ayant conscience de ses limites. En l'associant à des observations de terrain, il sera possible de rendre plus systématique une telle approche, et ce quelque soit les matériaux et les appareils en présence comme il a été possible de l'observer sur la chapelle.

Concernant cette dernière, l'étude statistique a permis de mettre en évidence des traitements préférentiels non seulement en fonction du matériau mais aussi selon la phase à laquelle appartient le bloc et son emplacement dans la structure. Ainsi il a été constaté que les encadrements d'ouvertures et les angles de la deuxième phase de construction (XVIIe siècle) avaient bénéficiés de traitements plus poussés pour leur donner une forme et une taille plus régulières que ceux de la première phase (fin Xe – Début XIe).

L'analyse pétrographique confirme l'hypothèse d'une origine locale émise à l'occasion de l'étude archéologique du bâti de 2009. Évoquer un faible investissement dans la construction serait erroné au regard des agencements effectués et les traitements appliqués selon les périodes. Il serait plus approprié de parler d'une exploitation locale opportuniste de l'environnement dans lequel s'est installé le prieuré. De plus, il faut noter que la grande majorité des villes et villages des environs ont été érigés avec les matériaux présents dans le sous-sol immédiat notamment l'église et le manoir épiscopal de Saint-Malo-de-Beignon, résidence d'été des évêques de Saint-Malo.

Paléoenvironnement

1. Palynologie

Quatre séquences polliniques ont été étudiées (Figure 20) sur la commune de Paimpont, soit de façon globale soit en complétant une étude déjà commencée. Elles ont permis d'identifier 13 zones polliniques qui décrivent l'évolution depuis la fin du Tardi-glaciaire (Figure 21 à 18).

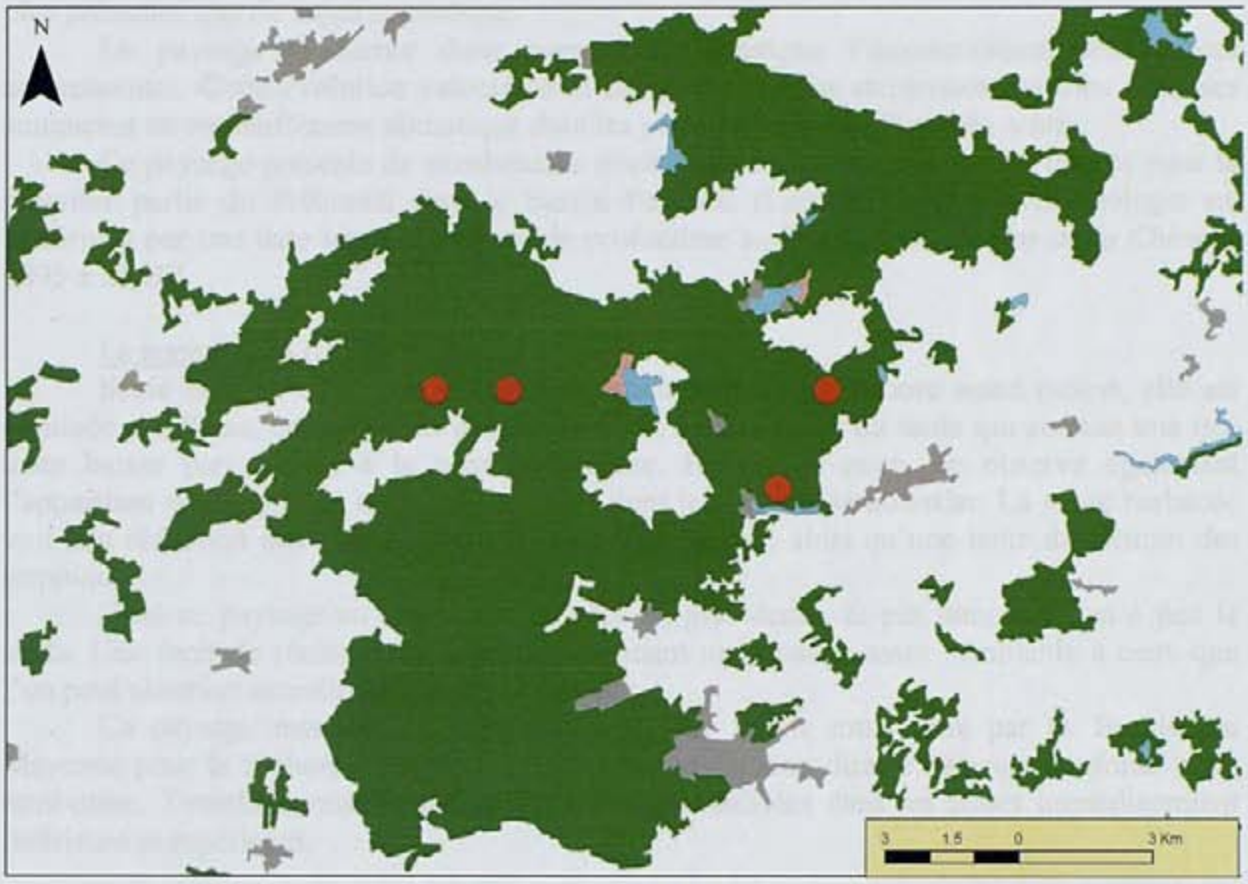


Figure 20 : Carte de répartition des séquences polliniques. D'Est en ouest : *Le Pas de la Chèvre, Trécélien, Les Noës Blanches* et *le Gué Mony.*

La zone PAIM I : le Dryas récent

Cette première zone régionale est observée uniquement à la base de la séquence du *Pas de la Chèvre* (CPC 1), elle se caractérise par un paysage très ouvert où dominent les graminées et les cypéracées. Un cortège d'herbacées steppiques les accompagne, dont *Filipendula, Thalictrum, Gallium, Sanguisorba* officinalis et également les armoises, qui présentent un taux légèrement supérieur à 5%. Les rares ligneux sont dominés par le saule et le bouleau juste devant le pin. On observe également la présence de *Juniperus* et *Ephedra distachya*.

Ce cortège pollinique décrit un environnement ouvert et froid. La présence du genévrier et du raisin de mer témoigne de condition hydrométrique globalement plutôt sèches, même si des phases légèrement plus humides semblent se dessiner avec leur pisparition ponctuelle en milieu de zone.

Cette phase semble correspondre avec le Dryas récent qui a été décrit par Limondin-Lozouet et al. (2005). Une date radiocarbone à 334 cm de profondeur vient confirmer cette attribution 10605 ± 30 BP (12655 - 12528 à 90,7 cal.BP % ; 12466 – 12437 cal.BP à 4,7 %)

La zone PAIM II : Le Préboréal 1

Les forte variation de Betula et Cyperaceae entre cette phase et la précédente indique la présence probable d'un hiatus sédimentaire entre les échantillons 303 et 305 cm.

Elle n'a été décrite qu'à partir de la séquence du *Pas de la Chèvre* (CPC 2). Elle se caractérise par une fermeture du paysage suite à un important développement du bouleau et du saule, qui atteint ici son maximum à près de 30%. Pendant cette période le pin connaît également un essor, passant de 5 à plus de 20%. La flore herbacée se modifie également. Bien que se maintenant à plus de 30%, les *Poaceae* décroissent. Dans le même temps, les *Cyperaceae* diminuent très fortement jusqu'à des taux inférieurs à 10% et les armoises ne sont plus présentes que de façon sporadique.

Le paysage se ferme donc comme en témoigne l'augmentation des espèces arborescentes. Cette évolution associée à la baisse des taxons steppiques dont les armoises annoncent un réchauffement climatique dont les premiers effets se font déjà sentir.

Ce paysage présente de nombreuses similitudes avec ceux qui ont été décrits pour la première partie du Préboréal dans le Bassin Parisien. (Leroyer 1997). Ce chronologie est confirmée par une date située à 289 cm de profondeur su la séquence du *Pas de la Chèvre* : 9895 ± 25 BP.

La zone PAIM III : Le Préboréal 2

Seule la zone CPC 3 la décrit. Présentant un paysage encore assez ouvert, elle est dominée par *Pinus*, dont les taux avoisinent 50%, au détriment du saule qui connaît une très nette baisse par rapport à la zone précédente. En fin de zone, on observe également l'apparition en continu de taxons mésophiles dont le chêne et le noisetier. La strate herbacée voit une réduction des *Poaceae* au profit de *Cyperaceae*, ainsi qu'une lente disparition des steppiques.

Dans ce paysage au boisement de plus en plus dense, le pin remplace peu à peu le saule. Une forêt de résineux se développe formant un paysage assez semblable à ceux que l'on peut observer actuellement en zone de taïga.

Ce paysage ressemble à celui qui a pu être décrit entre autre par D. Barbier en Mayenne pour le Préboréal (Barbier 1999). Aucune datation directe ne vient conforter cette attribution. Toutefois, cette bénéficie des datations réalisées dans les zones immédiatement inférieure et supérieure.

La zone PAIM IV : Le Boréal

Définie uniquement sur la base de la zone CPC 4, elle présente une dynamique de fermeture du milieu due à l'essor de *Quercus* et au développement de *Corylus*. Le bouleau reste très présent tout au long de cette zone tandis que le Pin décroît pour atteindre des environ 10%. Le cortège herbacé voit diminué très nettement les cypéracées qui passent de 45 à moins de 10%, tandis que les Poacées se maintiennent à des valeurs proches de 5%.

Au cours de cette phase, le réchauffement du climat entamé à partir de la phase PAIM II continue de se faire ressentir. Les taxons mésophiles apparus dans la seconde moitié du Préboréal prennent une place prépondérante dans le paysage. Le chêne se développe rapidement et remplace le pin dans les forêt, tandis que le noisetier semble se développe : une chênaie mixte s'installe.

Cette dynamique paysagère se singularise par rapport aux autres séquences du massif armoricain. Dans celles-ci le noisetier est la première essence à se développer, puis vient le chêne. Des équivalents ont toutefois pu être observés un peu plus au sud (Oldfield 1964; Marambat & Roussot-Larroque 1989; Penalba 1994; Joly 2006). Cette phase correspondrait donc au Boréal, ce qui est renforcé par une date indirecte réalisée dans le cadre de l'analyse isotopique et replacé sur la base de l'histoire de la végétation (8195 ± 25 BP).

La zone PAIM V : L'Atlantique ancien 1

Au cours de cette zone, décrite uniquement sur la base de CPC 5, on assiste à une explosion du noisetier qui atteint son maximum avec une fréquence supérieure à 75%. En parallèle de cet essor, le chêne et le bouleau très présents précédemment connaissent de franches baisses de leur fréquences, tout comme le pin qui disparaît presque en fin de zone. En fin de zone, l'orme, déjà présent de façon sporadique, s'installe en continu à une fréquence de moins de 1%.

La zone PAIM VI : L'Atlantique ancien 2

Cette zone n'a pu être observée que sur la séquence du *Pas de la Chèvre* (CPC 7) ainsi que celle de *Trécélien* de façon plus partielle (TRE 1). Son cortège pollinique se caractérise par une très dominance du noisetier qui s'accompagne du chêne et, en local, du bouleau. On y observe également une stabilisation de l'orme en courbe continue aux environs de 2%, tandis que l'aulne, s'installe durablement et que le tilleul fait son apparition. La strate herbacée ne connaît, quand à elle, que peut d'évolution en dehors d'une légère reprise des *Cyperaceae* au niveau local.

La zone PAIM VII : L'Atlantique récent

Cette zone régionale n'a pu être observé que le site du *Gué Mony* (GMO 1). Elle se caractérise par un fort taux de Tilia (plus 10 %) associé à une végétation arborescente dominée par le noisetier et le chêne. L'aulne fait son apparition à de faibles fréquences mais de façon continue.

Cette zone peut être attribuée à l'Atlantique récent par comparaison avec d'autre séquences du massif armoricain (Barbier 1999; Ouguerram 2002). Cette chronologie mériterait d'être confirmée par une date radiocarbone puis qu'un hiatus la sépare de la GMO 2 dans la seule séquence où elle a pu être observée.

La zone PAIM VIII : Le Suboréal

Cette phase a pu être observée sur trois séquence : CPC, GMO et NBL. Elle se caractérise principalement par l'apparition du hêtre dans un milieu dominé par chêne et le noisetier. Sur la zone humide, l'aulne est généralement très bien représenté et présente ici ses valeurs maximales. Le tilleul décroît mais reste généralement présent autour de 5 %.

Ce paysage correspond à ceux qui ont été décrit pour le Suboréal dans le Massif armoricain et dans le Bassin parisien (Leroyer 1997; Barbier 1999; Cyprien 2002). Cette attribution est confortée par plusieurs datations réalisées sur les séquences du *Pas de la chèvre, Noës Blanches* et *Gué Mony* (CPC 121 : 3720 ± 15 BP ; CPC 75-76 : 3170 ± 15 BP ; NBL 273 : 3775 ± 20 BP ; NBL 159 : 3030 ± 15 BP ; GMO 139 : 3645 ± 30 BP).

La zone PAIM IX : Le Subatlantique 1

Cette zone n'a pu être observée que sur une seule des quatre séquences. Sa description se base sur la zone GMO 4-5. Elle se caractérise par un léger développement de Fagus qui bien que faiblement représenté dépasse régulièrement 1 %. En parallèle, le milieu tend à s'ouvrir et les indices d'anthropisation se multiplient (diversification des adventices et rudérales, développement des cultures…).

Cette période est calée chronologiquement grâce à une datation radiocarbone à 56 cm de profondeur sur le site du *Gué Mony* (2385 ± 20 BP)

La zone PAIM X : Le Subatlantique 2

Cette zone a été décelée sur l'ensemble des séquences (CPC 8, TRE 2-3-4, NBL 4-5, GMO 6). Elle se singularise de la précédente par l'apparition de deux taxons arborescents: *Castanea* et *Juglans*. Souvent présents de façon sporadique au départ, rapidement ils tendent à s'installer de façon continue, notamment le châtaignier. Dans le même temps, on assiste à un essors des taxons cultivés : *Cerealia type*, *Secale* voire *Fagopyrum*.

Cette zone a pu être daté de façon directe sur la séquence de Trécélien (TRE 164-165 : 1925 ± 30 BP). Elle semble commencer à la fin de l'Âge du Fer ou au début de la période gallo-romaine, lorsque le châtaignier et le noyer sont introduits en Armorique.

La PAIM XI : Le Subatlantique 3

Cette zone a pu être observée sur les quatre sites : NBL 3, TRE 5, GMO 4, CPC 11 et 12. Sa végétation se caractérise par une augmentation du hêtre qui prend une place prépondérante dans le couvert forestier régionalement en recul. Localement il peut même, comme au *Pas de la Chèvre*, devenir l'espèce majoritaire au sein des boisements. On y assiste également à un essor de l'anthropisation avec, notamment, un développement de la culture des céréales et du blé noir (*Fagopyrum aesculentum*).

Elle correspond à la fin du Moyen Âge et au début de la période d'activité des Forges. Les besoins croissant de combustible réduisent grandement le signal forestier, mais il semble toutefois que le hêtre, bien que taxon dryade, soit favorisé par le mode d'exploitation du bois.

Cette zone est calée chronologiquement grâce à une la date TRE 57-59 (510±55 BP) ainsi que par la date indirecte CPC 34 (105 ± 15 BP).

La zone PAIM XII : Le Subatlantique 4

Les quatre séquences présentent cette zone (CPC 13, TRE 6, GMO 5, NBL 5). Il s'agit d'une phase dominée par les *Ericaceae*. L'ensemble des espèces arborescentes déclinent (chêne, hêtre) voire disparaissent localement (noisetier, saule…). Le paysage est dominé par une végétation de type lande, généralement rase, bien que par endroit des landes hautes à *Ulex* puissent être observées (*Gué Mony*).

Cette phase de l'histoire de la végétation du massif de Paimpont correspond sans doute à la période d'activité maximale des Forges. Bien qu'aucune date ne viennent directement conforté cette hypothèse, la zone bénéficie de la datation indirecte CPC 34 (105 ± 15 BP) de la zone précédente et des données historiques corrélée avec la période suivante.

La zone PAIM XIII : Le Subatalntique 5

Elle a pu être observée dans la partie sommitale de 3 séquences (CPC 14, GMO 6, NBL 5). Elle se caractérise par une fermeture du milieu due à un développement de *Pinus*, qui atteint des valeurs supérieures à 30%. De légères hausses du chêne et du noisetier peuvent également être observées. Les landes connaissent globalement un très net recul, sauf sur le site des *Noës Blanches*, où un pic d'*Ericaceae* est observé en milieu de zone.

Il se produit ici un très net regain des boisements mené notamment sous l'impulsion du pin. Il s'agit ici d'une dynamique initiée par le développement de la sylviculture dans un but de valorisation des landes. Les pins sont plantés dans ces secteurs considérés comme improductifs, ils remplacent les végétations de landes où se développent les Ericacées.

Bien qu'aucune date ne confirme l'attribution récente de cette zone, sa situation systématique en sommet de diagramme, la datation indirecte CPC 34 (105 ± 15 BP) et la comparaison aux données textuelles indiquent qu'il s'agit ici des variations subactuelle du paysage, depuis la première moitié du 19° siècle.

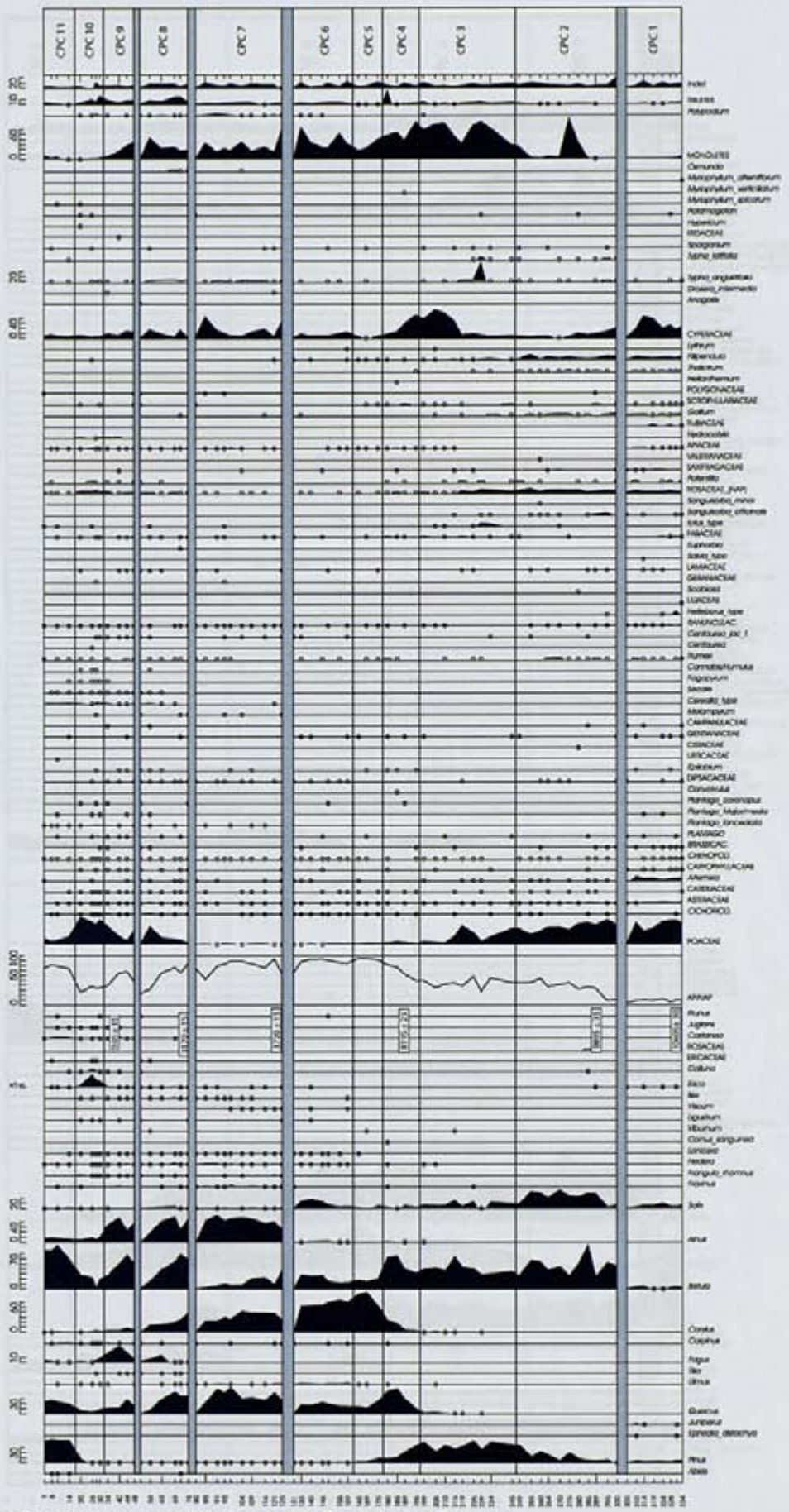


Figure 21 : Diagramme pollinique du *Pas de la Chèvre.*

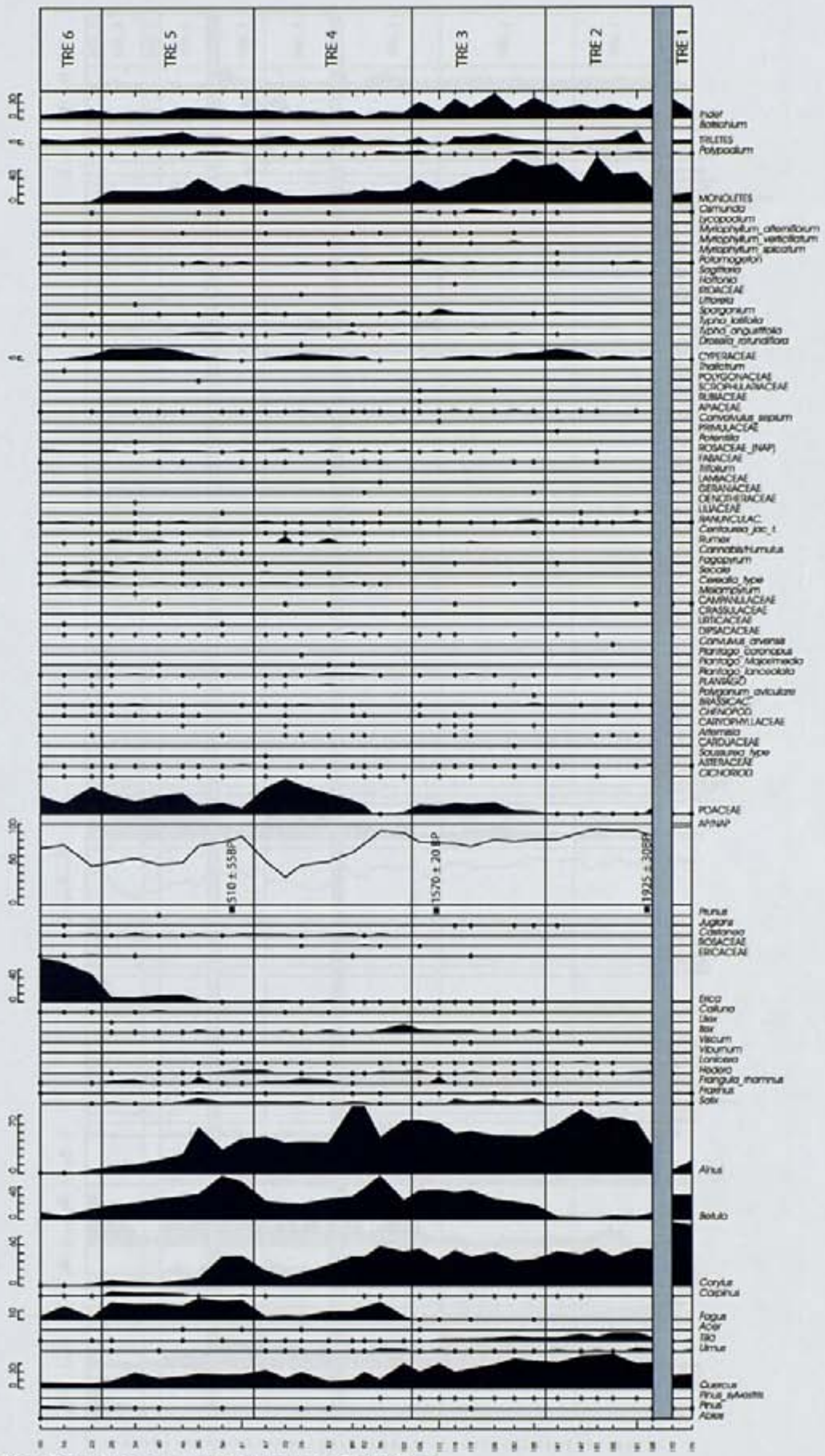


Figure 22 : Diagramme pollinique de *Trécélien.*

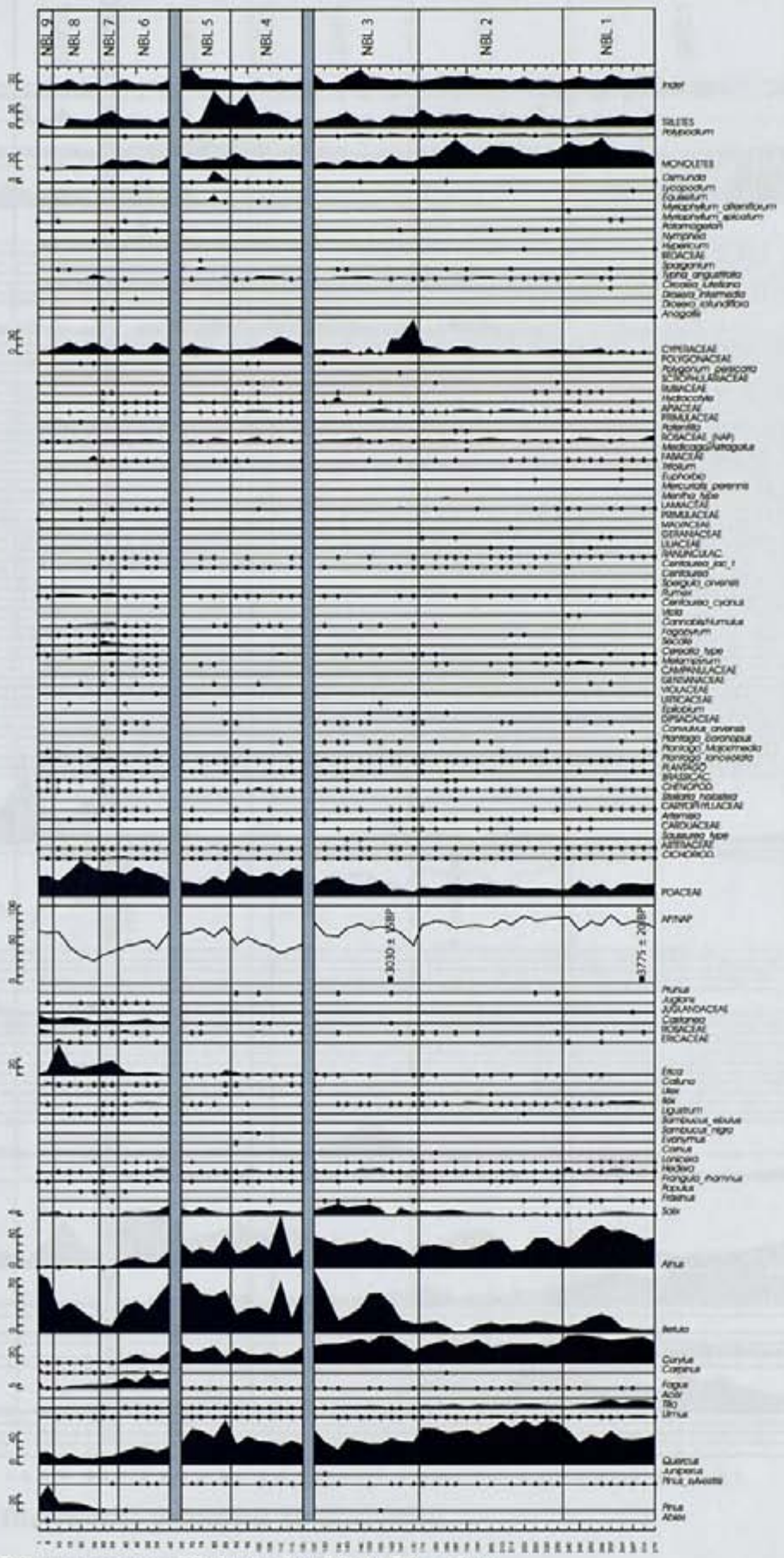


Figure 23 : Diagramme pollinique des *Noës Blanches.*

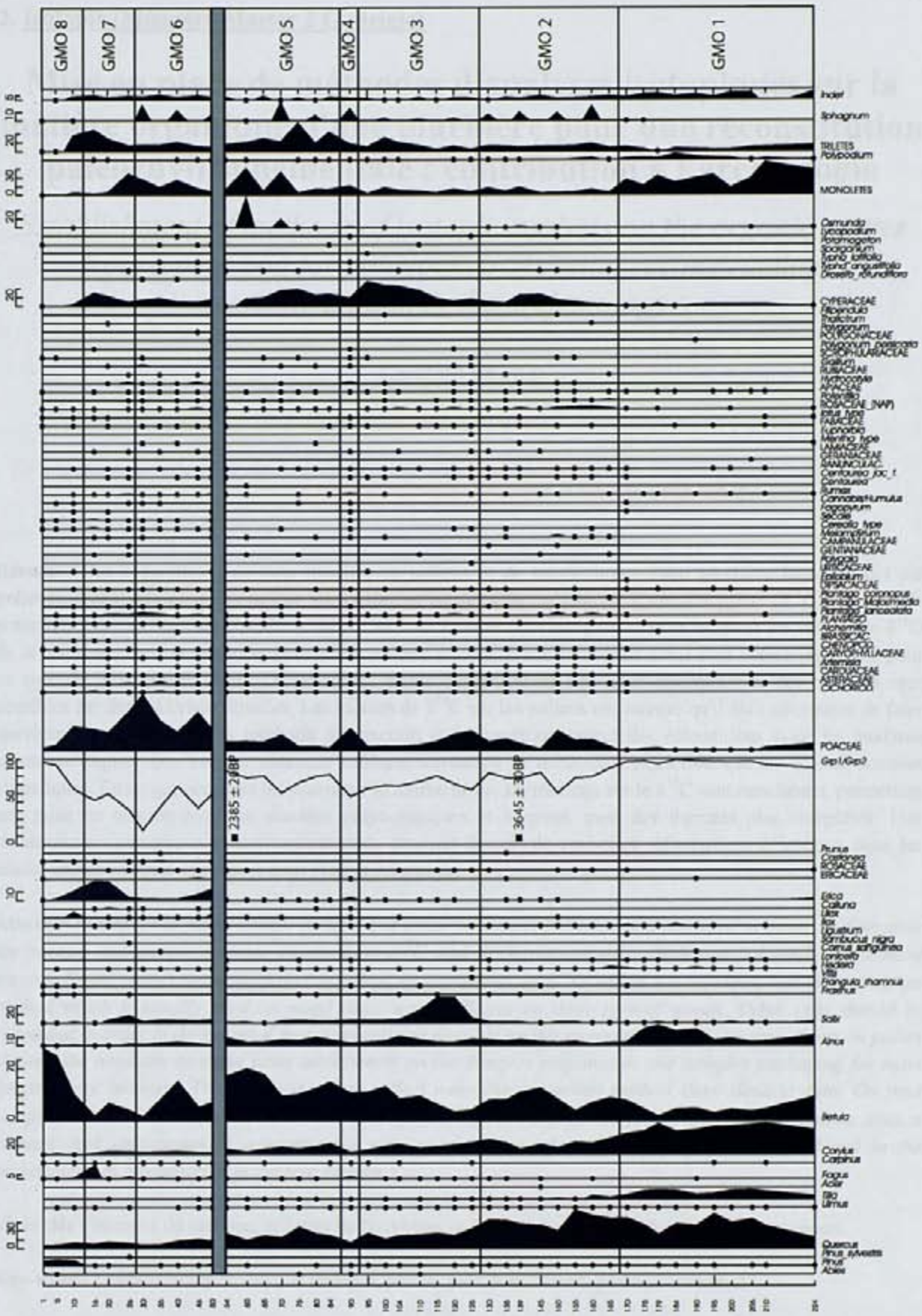


Figure 24 : Diagramme pollinique du *Gué Mony*.

2. Isotopie (Mémoire Master 2 C. Beigle)

Mise en place de méthodes d'analyses isotopiques sur la matière organique d'une tourbière pour une reconstitution paléoenvironnementale : contribution à l'archéologie

Establishment of methods of isotopic analysis on the organic matter from a peat bog for palaeoenvironmental reconstruction : contribution to the archaeology

Caroline BEIGLE

Résumé : Des échantillons de bois fossiles, de pollens et de tourbe brute d'une tourbière bretonne ont été prélevés et analysés pour déterminer les teneurs en isotopes de carbone ($\delta^{13}C$) et d'oxygène ($\delta^{18}O$) qui sont de potentiels traceurs environnementaux. Ainsi, les bois fossiles devaient permettre de mesurer les valeurs de $\delta^{18}O$ de la cellulose, mais la méthode d'extraction utilisée à l'origine sur du bois de cerne s'est avérée inefficace pour ce type de bois gorgés d'eau. De nouveaux essais devront avoir lieu pour déterminer si des mesures sont possibles sur des matériaux fossiles. Les valeurs de $\delta^{13}C$ sur les pollens ont montré qu'il était nécessaire de faire quelques ajustements sur la méthode d'extraction et le conditionnement des échantillons pour les analyses spectrométriques. Les valeurs obtenues reflètent davantage la méthode d'extraction que de réelles données climatiques. En ce qui concerne les essais sur la tourbe brute, les résultats sur le $\delta^{13}C$ sont concluants, permettant une mise en relation avec les données palynologiques et à terme, avec des données plus complètes. Une reconstitution climatique et environnementale pourrait fournir de nouvelles informations à intégrer dans les études archéologiques effectuées dans l'Ouest Atlantique.

Abstract : *Samples of fossil woods, pollens and peats have been collected and analyzed in order to determine the carbon and oxygen isotopic composition $\delta^{13}C$ and $\delta^{18}O$, respectively, which are potential environment tracers. Fossil woods were supposed to allow measurements of $\delta^{18}O$ values on cellulose, but the extraction method which is usually used on wood rings was inefficient on these type of woods. Other tests should be scheduled in order to determine if measurements are possible on this material. The $\delta^{13}C$ measurements on pollen showed the necessity to make some adjustments on the samples preparation and samples packaging for mass spectrometry analysis. The obtained values reflect more the extraction method than climatic data. On peat samples, the $\delta^{13}C$ values show links with some palynological data. In the future, with more complete data, a climatic and environmental reconstruction may provide new information which could be included in the archaeological investigation in western France.*

Mots clés : isotopes du carbone, isotopes de l'oxygène, pollen, tourbe, bois fossile, paléoenvironnement

Key-words : carbon isotopes, oxygen isotopes, pollen, peat, fossil wood, paleoenvironment

2.1 *Introduction*

Comprendre l'impact des changements climatiques passés sur l'histoire de l'Homme n'est pas chose aisée. Les effets de tels changements sur l'environnement et sur les populations et sociétés du passé ont été abordés par des climatologues, glaciologues, archéologues ou historiens. Ainsi, des variations climatiques rapides et/ou importantes ont pu engendrer des migrations, des adaptations, ou des mutations dans les activités sociaux-économiques des peuples nomades ou sédentaires. Comprendre le lien entre environnement et population est un sujet d'actualité, tant d'un point de vue d'études portant sur le passé que sur l'avenir.

Le Massif armoricain étant un territoire sur lequel l'implantation humaine remonte au Paléolithique, sa population a été soumise jusqu'à l'actuel à de nombreux changements climatiques, majeurs d'ordre millénaire et plus nuancés d'ordre séculaire. Déterminer les effets de ces changements sur les sociétés humaines du Massif armoricain apporterait des informations précieuses pour mieux comprendre la répartition des peuplements de l'Ouest Atlantique, les phénomènes d'adaptation aux crises climatiques ou encore l'influence de périodes clés de l'histoire climatique comme le Petit Optimum Médiéval ou le Petit Âge Glaciaire.

Le Massif armoricain, par son ouverture littorale et sa composante continentale, représente donc un cadre d'étude idéal pour confronter les variations climatiques holocènes et leur impact sur les sociétés humaines. L'intérêt de cette étude s'est porté plus particulièrement sur la commune de Paimpont et ses environs. Une étude palynologique effectuée sur une tourbière de Paimpont par J-C Oillic, doctorant à l'UMR 6566 de Rennes, a apporté les premières informations sur les changements de végétation au cours de l'Holocène. Une comparaison des données palynologiques avec celles d'autres traceurs environnementaux, isotopiques par exemple, permettra de prendre en compte le climat comme l'un des facteurs potentiellement influant sur la répartition des populations d'un site. Outre les données palynologiques qui informent sur la variabilité de la végétation au cours du temps, les données climatiques, telles que la température et l'humidité, peuvent être abordées à partir de données isotopiques de l'oxygène et du carbone acquises sur des échantillons organiques collectés dans une tourbière. Les teneurs de la matière organique en isotopes d'oxygène (^{16}O et ^{18}O) et de carbone (^{12}C et ^{13}C) peuvent être mises en relation avec l'environnement climatique (Ferhi et al., 1982) et le type de végétation contemporain du dépôt sédimentaire (Balesdent, 1991). Les outils isotopiques ont montré leur capacité à caractériser un climat ancien à partir de divers types d'échantillons (bois, glace, eau) (Ghosh et Brand, 2003 ; Bortoluzzi, 2006 ; Chang et al., 2009).

Le but de cette étude est de tester la faisabilité des prélèvements et des mesures isotopiques de carbone et d'oxygène sur de la tourbe à travers une comparaison de méthodes analytiques appliquées à différents éléments végétaux présents dans cette tourbe, à savoir des bois gorgés d'eau, des pollens et la tourbe elle-même. Ces derniers résultats, mis en parallèle avec les données historiques, géographiques et palynologiques de Paimpont, permettent une approche originale des isotopes de carbone et d'oxygène comme traceurs climatiques potentiels utilisables pour des échantillons holocènes du Massif armoricain. L'objectif de cette recherche est à terme de définir la nature et l'intensité des variations climatiques qui ont eu lieu pendant l'Holocène dans l'Ouest Atlantique.

2.2 Zone d'étude

La tourbière sélectionnée pour cette étude est située en forêt de Paimpont (Ille-et-Vilaine) sur le lieu-dit "*Carrefour du Pas de la Chèvre*" (Figure 25).

Figure 25 : Localisation et étendue de la forêt de Paimpont, Ille-et-Vilaine (35)

La forêt de Paimpont, avec une surface d'environ 7 500 ha, représente le plus grand ensemble forestier de Bretagne. Le relief variable se présente en deux grands espaces : la Haute-forêt, à l'Ouest, s'étend sur un secteur accidenté (point culminant à 268 m) composé de schistes pourpres et de grès armoricain tandis que la Basse-Forêt, à l'Est, occupe une étendue à faibles dénivellations de schiste vert ordovicien dont l'altitude ne dépasse pas 150 m (Oillic et al., 2009).

Le climat de type océanique de Paimpont se caractérise par des hivers doux (4°C en moyenne) et des étés frais (17°C) avec une pluviométrie supérieure à 800 mm/an pouvant dépasser les 1000 mm/an en Haute-Forêt.

Le climat, le substrat et la topographie de la région expliquent la présence de multiples ruisseaux parcourant la forêt qui ont généré de nombreuses zones humides permettant la conservation d'éléments organiques dans le sol, dont certains végétaux tels que des bois ou des pollens. L'une de ces zones humides est la tourbière du *Carrefour du Pas de la Chèvre.* Cette tourbière a fait l'objet d'une analyse pollinique (Thèse de J-C Oillic, UMR 6566) et l'histoire de la végétation couvre une période allant du Tardiglaciaire à l'actuel.

2.3 Matériel et méthodes

2.3.1 Échantillonnage

Les mesures isotopiques ont été faites sur des échantillons de tourbe brute (Tillman et al., 2010), dans laquelle des restes de bois fossilisés et des pollens ont été prélevés (Fabing,

1996). La tourbe s'est développée dans un milieu anaérobie ce qui a permis de préserver des échantillons végétaux organiques.

La tourbe brute prélevée en octobre 2009 par carottage manuel est une tourbe acide à sphaignes. La végétation environnante est un bois clair principalement constitué de bouleaux. La carotte CPC-3, composée de 6 tronçons de 45 cm, est d'une longueur totale de 2,70 m. Chaque tronçon a été stocké dans un sac plastique afin d'éviter toute contamination en pollens actuels. Au laboratoire, la carotte a ensuite été découpée tous les 2 cm. Chaque échantillon est par la suite stocké dans des nacelles en aluminium.

Des prélèvements ont été réalisés pour les analyses isotopiques sur les sédiments en vrac, sur les bois et sur les pollens. Ils ont été effectués dans un premier temps sur les niveaux où l'on retrouvait des bois fossilisés. Les différentes essences de bois ont ensuite été identifiées. Il en est ressorti que les essences majoritairement présentes dans la séquence étaient le bouleau, l'aulne et le saule (Figure 26), chose qui concorde avec les données fournies par le diagramme palynologique (Figure 27). Une série de 25 échantillons a été sélectionnée pour les analyses isotopiques de l'oxygène sur la base de la présence de bois de bouleau qui est (1) l'essence la plus présente en continu et (2) de manière quasiment homogène tout le long de la carotte. Le but de cette étude étant de permettre une comparaison entre les différentes méthodes d'analyse utilisées, pour chaque niveau où des bois ont été prélevés, un échantillon de 6 g de tourbe et un échantillon de 1,5 cm^3 de tourbe ont aussi été gardés pour permettre les analyses isotopiques de carbone sur les pollens et la tourbe brute.

Les échantillons destinés aux analyses isotopiques sur la tourbe brute et les bois, écorcés puis lavés à l'eau pure, ont été séchés à l'étuve. Les 25 échantillons de chaque ont été conservés dans de l'aluminium jusqu'au moment de l'analyse.

Afin de pouvoir caler chronologiquement les données isotopiques, quatre échantillons de bois parmi les bois fossiles ont été sélectionnés et envoyés au Centre d'Études Nordiques (CEN, Université de Laval, Canada) pour des datations au radiocarbone ^{14}C par AMS (Accelerator Mass Spectrometry) (Tableau 1). Au total, quatre datations calibrées ont pu être obtenues. La dernière de ces datations s'avère aberrante, le bois envoyé pour analyse était peut-être un morceau de racine. Elle ne sera donc pas prise en compte.

Des analyses polliniques de certains niveaux de la carotte CPC-3 ont permis de caler la séquence avec celle étudiée par J-C Oillic par l'analyse palynologique et de fournir des datations relatives de certains niveaux. Il a ainsi été possible de retrouver les grandes périodes stratigraphiques pour la séquence CPC-3.

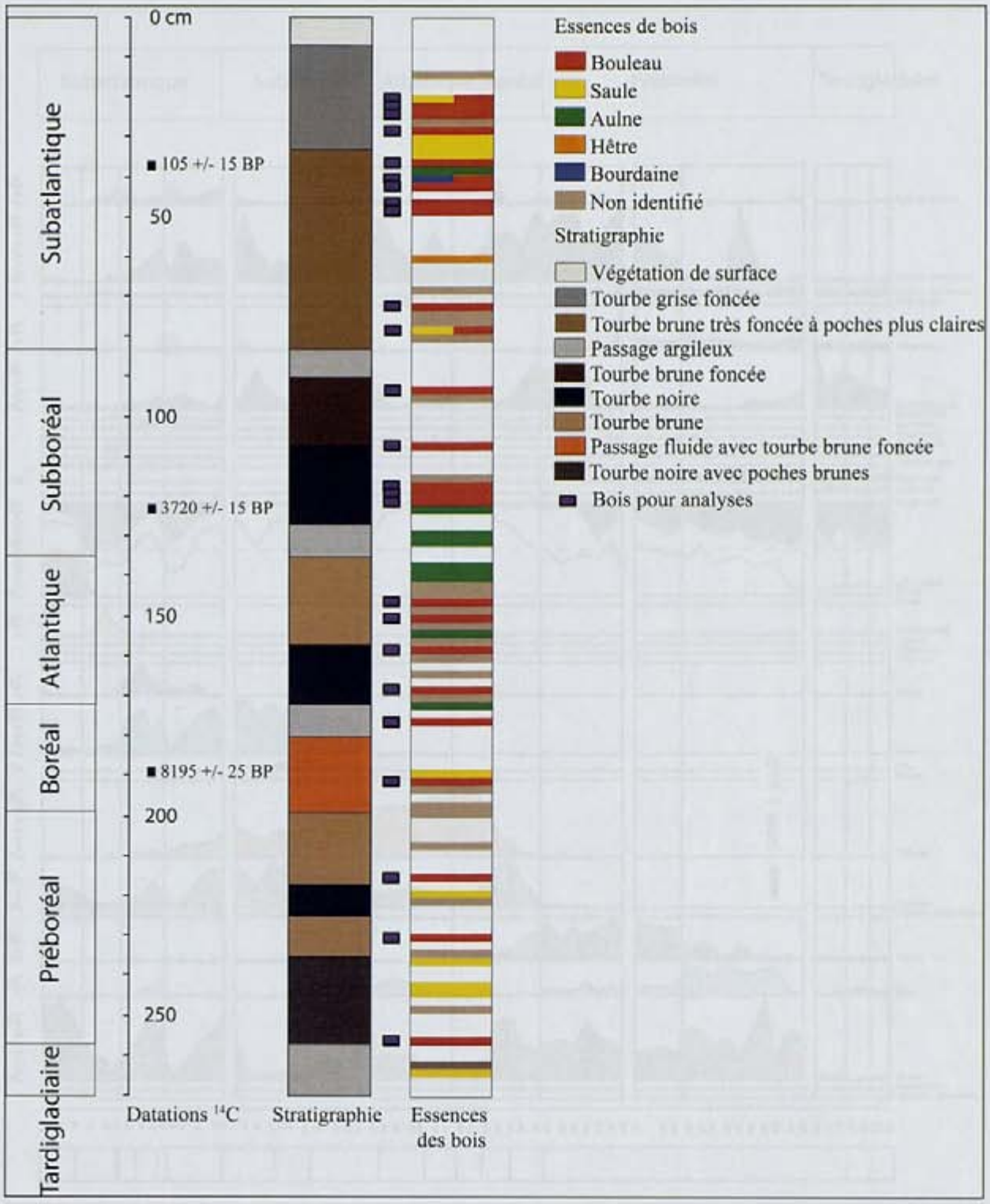


Figure 26 : Log de la carotte CPC-3 prélevée à Paimpont : données des bois fossilisés (à droite), de stratigraphie (au centre) et de datation (à gauche).

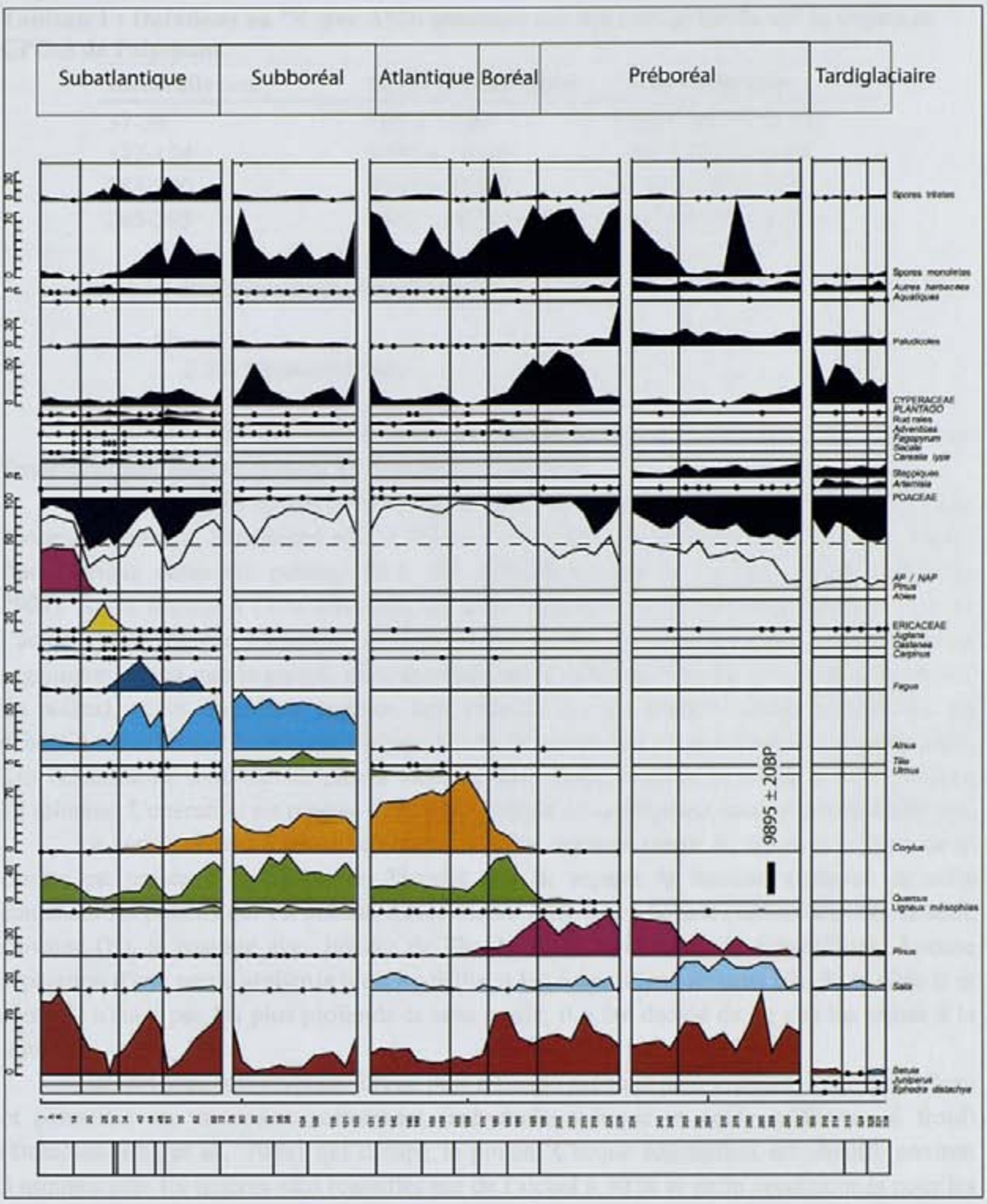


Figure 27 : Diagramme pollinique d'une carotte prélevée dans la tourbière du *Carrefour du Pas de la Chèvre* à Paimpont. Étude et données de J-C Oillic (UMR 6566, Centre de Recherches en Archéologie, Archéosciences et histoire, Rennes).

Tableau 1 : Datations au ^{14}C par AMS obtenues sur des bois prélevés sur la séquence CPC-3 de Paimpont.

Intervalle (cm)	Dates non calibrées	Dates calibrées
37-39	105 ± 15 BP	1691-1925 Cal AD
122-124	3720 ± 15 BP	2197-2027 Cal BC
188-190	8195 ± 25 BP	7311-7082 Cal BC
263-265	3915 ± 20 BP	2473-2341 Cal BC

2.3.2 Préparation des échantillons

2.3.2.1Sporopollenine

La préparation des échantillons de pollen a eu lieu au laboratoire du Pôle Environnement Nantais (Polen) à l'Université de Nantes.

Les échantillons de tourbe brute encore humide ont subi un bain d'acide chlorhydrique concentré pendant 10 minutes afin d'éliminer la fraction carbonatée, puis un bain d'acide fluorhydrique concentré pendant 48 h afin d'éliminer toute la fraction siliceuse (Lézine, 2008). Après rinçage à l'eau déionisée, les fluorosilicates sont par la suite éliminés avec de l'acide chlorhydrique concentré en bain-marie. Dans le but d'éliminer tous fragments organiques autres que le pollen, plus spécifiquement autre que l'exine (enveloppe extérieure du pollen), et les fragments argileux non attaqués par les attaques acides antérieures, les échantillons subissent un nouveau lavage à l'eau déionisée qui permet d'enlever le surnageant. Les échantillons sont ensuite placés dans un bain-marie avec de la soude à 10% pendant 15 minutes. L'opération est répétée deux fois. Chaque échantillon est ensuite tamisé à 200 µm.

La série contenant les échantillons les plus argileux (série A) situés à la base de la carotte est traitée à la liqueur de Thoulet afin de séparer la fraction argileuse de celle contenant les pollens qui est ensuite filtrée sur un filtre de carbonate (tableau 2). Sur la série suivante (B), le passage avec liqueur de Thoulet a été testé sur deux échantillons. Aucune séparation d'une partie argileuse n'étant visible et les échantillons restants (fin de la série B et série C) n'étant pas les plus profonds et sans argile, il a été décidé de ne pas les traiter à la liqueur.

Suivent plusieurs rinçages à l'eau puis à l'acide acétique pour éliminer toute trace d'eau et permettre un traitement acétolysant (anhydride acétique et acide sulfurique à froid) (Descolas-Gros et al., 2001) qui décape le pollen. Chaque échantillon est chauffé environ 3 minutes puis les pollens sont regonflés par de l'alcool à 30 % et enfin conditionnés pour les mesures spectrométriques.

2.3.2.2Tourbe

Les échantillons de tourbe brute ont été traités au laboratoire de chimie du Centre de Recherche en Archéologie, Archéosciences, Histoire (UMR 6566 - CReAAH, Université de Rennes 1).

Après séchage à l'étuve à 50°C dans des nacelles en aluminium, la tourbe a été finement broyée dans un mortier en Agathe puis décarbonatée avec 2 à 3 mL d'acide

chlorhydrique 1M. Cette étape permet d'ôter toute trace de carbone inorganique, sans toucher au carbone organique de la tourbe. Les échantillons sont ensuite rincés à l'eau déionisée pour enlever toute trace de chlore avant un séchage à l'étuve à 50°C.

2.3.2.3Bois

Les échantillons de bois sélectionnés ont été traités au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE, Gif/Yvette, France) selon la méthode utilisée pour extraire la cellulose des cernes des arbres, décrite par Green (1963) et modifiée par Leavitt et Danzer (1993).

Les bois sont broyés puis placés dans des filtres en téflon (pores de 10 µm) fermés hermétiquement en forme de sachets (Leavitt et Danzer, 1993) par un fil de téflon et numérotés avec une étiquette en téflon.

Pour éliminer les graisses et résines, les sachets sont placés dans un soxhlet avec un mélange de toluène et d'éthanol (2:1) chauffé à 70°C pendant 10 h. La manipulation est répétée avec du toluène (Ménot et Burns, 2001; Ménot-Combes et al., 2002).

Les molécules hydrosolubles sont retirées par un bain à l'eau déionisée maintenue à ébullition pendant 6 h.

La lignine est ensuite éliminée dans un mélange de 700 mL d'eau déionisée, 7 g de $NaClO_2$ et 1 mL d'acide acétique glacial laissé d'abord à chauffer à 70°C pendant 12 h. Suivent trois ajouts successifs à 70°C de 7 g de $NaClO_2$ et 1 mL d'acide acétique glacial à 2 h d'intervalle. Les échantillons subissent ensuite plusieurs rinçages à l'eau déionisée dans un bac à ultra-sons.

Afin d'ôter l'hémicellulose, les échantillons subissent un bain de soude pendant 1 h. Ils sont ensuite rincés à l'eau déionisée avant d'être plongés dans de l'acide acétique et à nouveau rincés.

Dans le protocole mis en place pour extraire la cellulose du bois de cernes, celle-ci est censée être blanche à la fin du traitement. Or, dans notre cas, les échantillons étaient encore très foncés. Pour tenter de remédier à ce problème, les étapes des bains à la soude et à l'acide acétique ont été répétées une seconde fois dans l'hypothèse où de l'hémicellulose serait restée dans les sachets.

Les sachets sont enfin séchés à l'étuve à 70°C au moins deux jours.

2.3.3 Analyses isotopiques

2.3.3.1$\delta^{13}C$

Les analyses isotopiques de $\delta^{13}C$ ont été effectuées au laboratoire des isotopes stables de l'UMR SENAH (Systèmes d'Elevage, Nutrition Animale et Humaine) de l'INRA à St-Gilles (France). Les valeurs de $\delta^{13}C$ ont été mesurées sur des échantillons solides secs et décarbonatés de tourbe, ainsi que sur des pollens en solution dans de l'alcool. Elles ont été obtenues à l'aide d'un analyseur élémentaire (CE 1500NA, Carlo Erba) couplé à un spectromètre de masse (Isoprime GV Instruments) à rapports isotopiques (EA-IRMS).

Chaque échantillon est placé dans une nacelle en étain qui subit une combustion complète, en présence d'excès d'O_2, dans un four à 1020°C formant du CO_2 et des oxydes d'azote. Ces derniers sont réduits dans un second four à 650°C en azote gazeux. Les gaz résultants (CO_2 et N_2) sont introduits dans le spectromètre de masse pour analyse. Le CO_2 de l'échantillon est mesuré par rapport à un gaz de référence de CO_2 de rapport isotopique connu. Les valeurs $\delta^{13}C$ des échantillons de tourbe et de pollens sont calculées comme la déviation relative entre le rapport $^{13}C/^{12}C$ mesuré de l'échantillon ($R_{échantillon}$) et le rapport $^{13}C/^{12}C$ de la référence internationale (R_{std}) (Vienna Pee Dee Belemnite, V-PDB), d'après la relation suivante :

$$\delta^{13}C\ [‰] = \frac{R_{échantillon} - R_{standard}}{R_{standard}} * 1000$$

Les standards internationaux mesurés donnent les valeurs suivantes : USGS 24 : $\delta^{13}C$ =-16.0±0.1 ‰ (n = 6) et Sucrose ANU : $\delta^{13}C$=-10.7±0.1 ‰ (n= 6). La précision des valeurs de $\delta^{13}C$ reportées est estimée à ±0.2 ‰ basée sur la répétition de standards de laboratoire et d'échantillons.

Le $\delta^{13}C$ traduit un enrichissement ou un appauvrissement relatif en ^{13}C résultant de l'existence de différentes voies métaboliques (effets cinétiques et/ou thermodynamiques différents) conduisant à une molécule finale qui n'aura pas le même rapport isotopique qu'une autre en fonction de la voie utilisée (Bortoluzzi, 2006). Ces variations de teneur en isotopes stables sont en relation avec l'environnement végétal et climatique (Ferhi et al., 1982). Selon les gammes de $\delta^{13}C$, il est possible de déterminer, par exemple, quel type de plantes compose la matière organique de la tourbe étudiée selon qu'elles sont plus adaptées à un milieu tempéré (plantes de type C3 avec $\delta^{13}C_{moyen}$: -27 ‰) ou plutôt tropical (plantes de type C4 avec $\delta^{13}C_{moyen}$: -13 ‰) (Smith et Epstein, 1971).

2.3.3.2 $\delta^{18}O$ de l'α-cellulose

Des mesures spectrométriques sur le $\delta^{18}O$ de la cellulose des bois prélevés étaient initialement prévues, mais suite à certains problèmes rencontrés lors de l'extraction de la cellulose, ces analyses n'ont pas pu avoir lieu. Cependant, les tests effectués ont montré qu'un composé, qui reste encore à déterminer, a résisté à l'extraction de la cellulose. Cette hypothèse a été mise en évidence par la couleur très foncée du contenu des sachets en téflon après traitement, laissant supposer que la cellulose n'était pas pure.

Ainsi, une analyse plus approfondie du contenu des sachets par spectrométrie infrarouge s'avère nécessaire afin de déterminer ce qu'il subsiste exactement des échantillons après traitement avant d'envisager de faire des mesures sur le $\delta^{18}O$.

De plus, l'acidité des sols du Massif armoricain a pu dénaturer ou minéraliser les bois et ainsi modifier leur composition chimique.
La méthode d'extraction de la cellulose utilisée pour les cernes des arbres pourra être adaptée pour les bois gorgés d'eau lorsque le problème rencontré ici aura été identifié.

2.4 Résultats

Pour la tourbe, les valeurs $\delta^{13}C$ obtenues sont comprises entre -27,2 ‰ et -29,4 ‰ avec une amplitude de 2,2 ‰ (tableau 3). Ces valeurs se situent dans des gammes de $\delta^{13}C$

correspondant bien à des plantes (Smith et Epstein, 1971). En visualisant les variations de $\delta^{13}C$ sur la figure 4, on observe que les maxima se placent à des profondeurs respectives de 46 cm (-27,2 ‰), 78 cm (-27,7 ‰) et 215 cm (-27,7 ‰) tandis que les minima se situent à 40 cm (-28,0 ‰), 72 cm (-28,6 ‰) et 119 cm (-29,4 ‰).

En ce qui concerne les pollens, les mesures ont, dans un premier temps, pour la plupart dépassé les limites de mesure du spectromètre. Les seuls échantillons à ne pas saturer étaient ceux de la série A des pollens traités à la liqueur de Thoulet. Les mesures ont donc été refaites et des dilutions manuelles et/ou par le système de dilution relié au spectromètre ont été effectuées selon les premiers résultats afin d'entrer dans les limites imposées par l'appareil (tableau 2).

Les valeurs des $\delta^{13}C$ des pollens sont comprises entre -30,3 ‰ et -41,1 ‰ avec une amplitude de 10,8 ‰. Elles sont inférieures aux valeurs normalement rencontrées pour les pollens et correspondent à des $\delta^{13}C$ de pétrole ou de charbons. Les maxima (selon la figure 4) se placent à des profondeurs situées à 24 cm (-30,4 ‰), 93 cm (-31,4 ‰), 146 cm (-33,3 ‰) et 215 cm (-30,3 ‰). Les minima se trouvent à 48 cm (-39,8 ‰), 107 cm (-41,0 ‰), 121 cm (-41,1 ‰) et 150 cm (-37,4 ‰).

Tableau 2 : Récapitulatif des étapes subies par les échantillons de pollens pendant le traitement

Intervalle (cm)	Série de pollen	Traitement du pollen	Dilution manuelle pour les pollens	Quantité analysée	Spectrométrie	$\delta^{13}C$ pollen (‰)
19-21	C		+120µL	20µL	diluteur	-38,3
21-23	C			20µL	diluteur	-38,8
23-25	B			20µL	diluteur	-30,4
27-29	C			20µL	diluteur	-34,7
35-37	B		+80µL	20µL	diluteur	-34,5
39-41	B	Thoulet	+120µL	20µL		-32,8
41-43	B	Thoulet	+100µL	20µL		-32,5
45-47	C			20µL	diluteur	-39,5
47-49	C		+80µL	20µL	diluteur	-39,8
71-73	B			20µL	diluteur	-33,2
77-79	B		+80µL	20µL	diluteur	-32,2
92-94	A	Thoulet	+80µL	20µL		-31,4
106-108	C			20µL	diluteur	-41,1
118-120	B			20µL	diluteur	-34,4
120-122	C			20µL	diluteur	-41,1
145-147	B		+80µL	20µL	diluteur	-33,4
149-151	C		+80µL	20µL	diluteur	-37,4
157-159	A	Thoulet		20µL		-32,1
167-169	A	Thoulet		40µL		-32,1
175-177	A	Thoulet		40µL		-31,3
190-192	A	Thoulet		40µL		-31,8
214-216	A	Thoulet	+80µL	40µL		-30,3
229-231	A	Thoulet		20µL		-34,8
255-257	A	Thoulet		40µL		-35,6

Les variations des valeurs de $\delta^{13}C$ de la tourbe sont indépendantes des variations du pourcentage en carbone organique des échantillons (figure 5), indiquant que ces valeurs sont reliées à une variation de végétation et non un effet de diagénèse de la tourbe.
La figure 4 permet de noter que les variations de $\delta^{13}C_{tourbe}$ et de $\delta^{13}C_{pollens}$ sont sensiblement identiques lors du Préboréal et du Boréal bien que d'intensité différente. En ce qui concerne les périodes de l'Atlantique, du Subboréal et du Subatlantique, les variations ne concordent pas, voire s'opposent parfois et l'intensité des variations de $\delta^{13}C$ pour les pollens est beaucoup plus élevée que celles de la tourbe. Aucune tendance n'est observée dans la relation entre $\delta^{13}C_{tourbe}$ et $\delta^{13}C_{pollens}$ (figure 6). Tableau 3 : Données isotopiques de carbone ($\delta^{13}C$ en ‰) de la tourbe brute et des pollens échantillonnés, pourcentage en carbone organique et stratigraphie des prélèvements effectués le long de la carotte CPC-3. Les intervalles indiquent la profondeur du prélèvement en centimètres.

Tableau 3 ***: Données isotopiques du $\delta^{13}C$ (en ‰) des échantillons de pollen et tourbe, teneur en carbone organique (%) et stratigraphie des échantillons dans la séquence. Les iintervalles indiquent la profondeur des échantillons.***

Intervalle (cm)	Stratigraphie	Profondeur (cm)	%C organique	$\delta^{13}C$ tourbe (‰)	$\delta^{13}C$ pollen (‰)
19-21	Tourbe grise foncée	20	24,4	-27,7	-38,3
21-23	Tourbe grise foncée	22	34,8	-27,6	-38,8
23-25	Tourbe grise foncée	24	15,9	-27,7	-30,4
27-29	Tourbe grise foncée	28	24,6	-27,8	-34,7
35-37	Tourbe très foncée	36	43,7	-27,7	-34,5
39-41	Tourbe très foncée	40	37,5	-28,0	-32,8
41-43	Tourbe très foncée	42	27,4	-27,7	-32,5
45-47	Tourbe très foncée	46	26,9	-27,2	-39,5
47-49	Tourbe très foncée	48	47,4	-27,5	-39,8
71-73	Tourbe très foncée	72	48,2	-28,6	-33,2
77-79	Tourbe très foncée	78	43,2	-27,7	-32,2
92-94	Tourbe brune foncée	93	29,2	-28,5	-31,4
106-108	Tourbe brune foncée	107	36,0	-29,0	-41,1
116-118	Tourbe noire	117	24,4	-29,4	
118-120	Tourbe noire	119	29,2	-29,4	-34,4
120-122	Tourbe noire	121	41,8	-29,1	-41,1
145-147	Tourbe brune	146	28,3	-28,7	-33,4
149-151	Tourbe brune	150	36,4	-28,8	-37,4
157-159	Tourbe noire	158	28,6	-28,9	-32,1
167-169	Tourbe noire	168	26,6	-28,6	-32,1
175-177	Grise argileux	176	10,7	-28,5	-31,3
190-192	Fluide, brun foncé	191	24,9	-28,7	-31,8
214-216	Tourbe brune	215	35,3	-27,7	-30,3
229-231	Tourbe brune	230	26,8	-28,6	-34,8
255-257	Tourbe noire, poches brunes	256	32,4	-29,3	-35,6

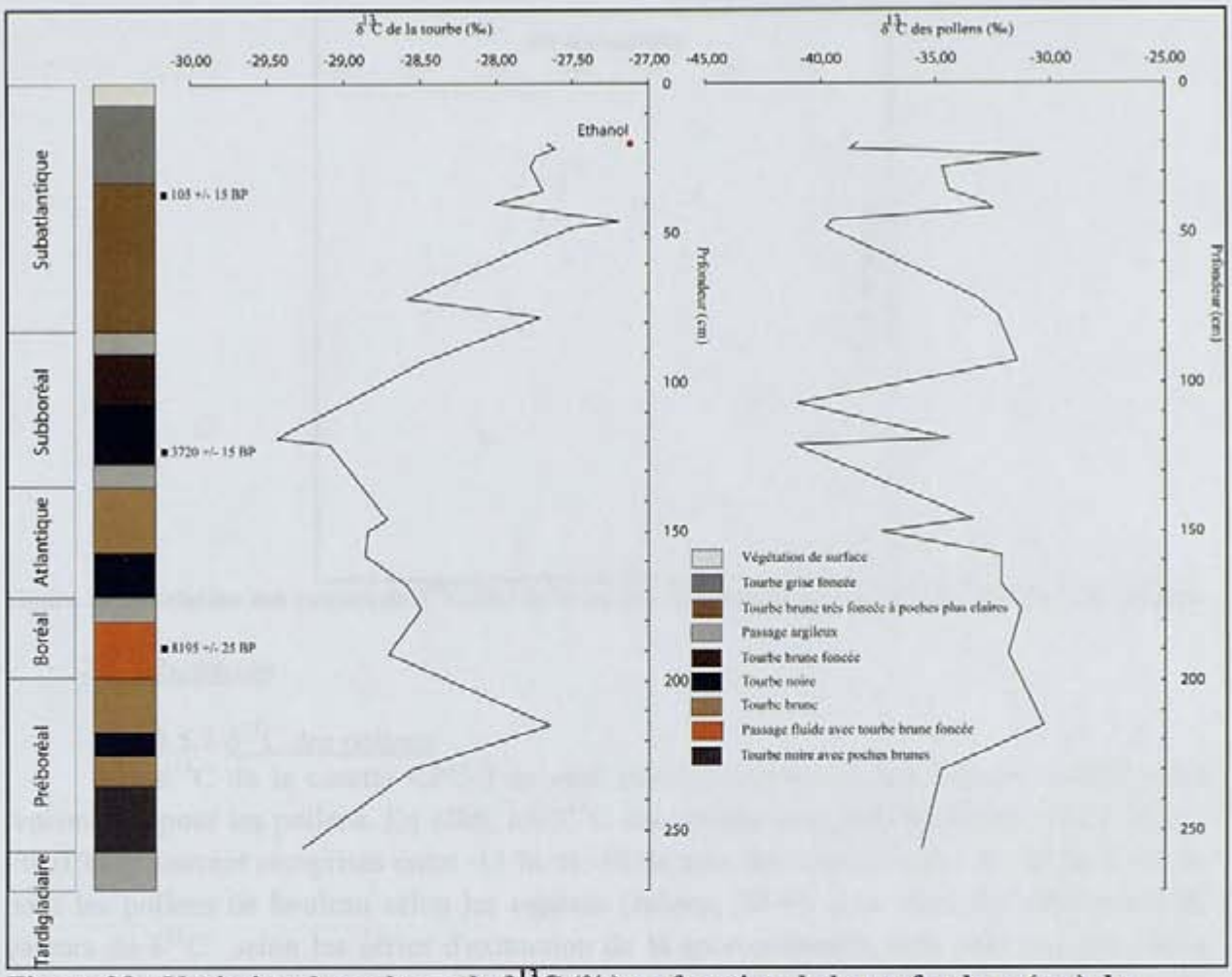


Figure 28 : Variation des valeurs de $\delta^{13}C$ (‰) en fonction de la profondeur (cm) du prélèvement pour la tourbe (à gauche) et pour les pollens (à droite) et stratigraphie de la carotte CPC-3.

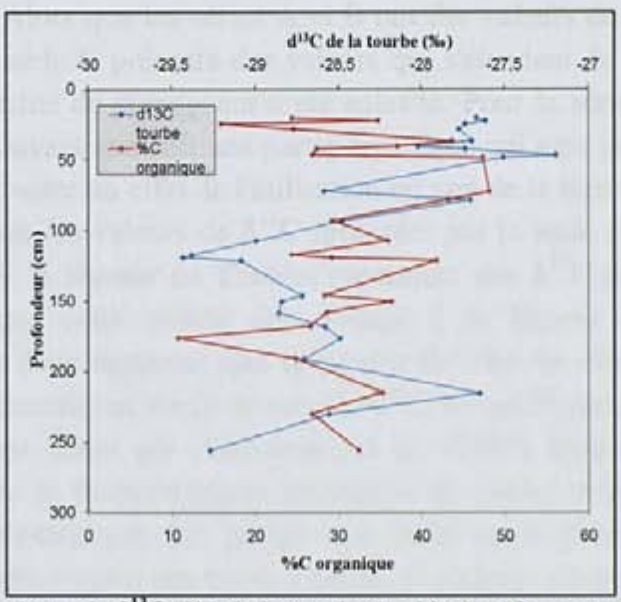


Figure 29 : Variation des valeurs de $\delta^{13}C$ (‰) de la tourbe (en bleu) et du pourcentage de carbone (en rouge) dans la carotte en fonction de la profondeur (cm)

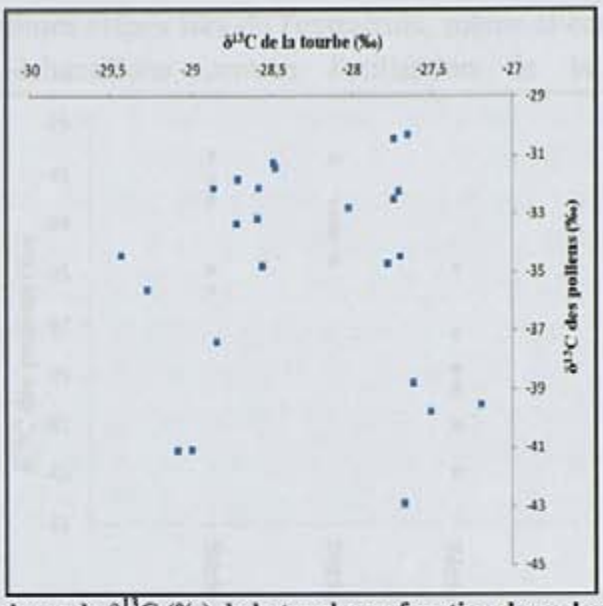


Figure 30 : Variation des valeurs de $\delta^{13}C$ (‰) de la tourbe en fonction des valeurs de $\delta^{13}C$ (‰) des pollens.

2.5 Discussion

2.5.1 $\delta^{13}C$ des pollens

Les $\delta^{13}C$ de la carotte CPC-3 se sont avérées inférieures aux valeurs normalement rencontrées pour les pollens. En effet, les $\delta^{13}C$ des pollens sont habituellement supérieures à -30,0 ‰ et souvent comprises entre -13 ‰ et -30 ‰ avec des valeurs allant de -24 ‰ à -28 ‰ pour les pollens de bouleau selon les espèces (Jahren, 2004). Aux vues des différences de valeurs de $\delta^{13}C$ selon les séries d'extraction de la sporopollenine, cela peut provenir de la méthode d'extraction de la sporopollénine ou bien du conditionnement des échantillons avant le passage en spectrométrie de masse.

Concernant la méthode d'extraction des pollens, on peut noter que l'on retrouve des plages de $\delta^{13}C$ différentes selon les trois séries (Tableau 2) de huit échantillons traitées séparément (Figure 7). Alors que les séries A et B ont des valeurs de $\delta^{13}C$ comprises entre -35,6 ‰ et -30,3 ‰, la série C présente des valeurs qui s'étendent de -41,1 ‰ à -34,7. Dans les séries A et B, la totalité du surnageant a été enlevée. Pour la série C, il est resté un peu plus de ce surnageant pouvant contenir une partie organique qui a pu jouer sur les mesures.

De plus, on peut noter un effet de l'utilisation ou non de la liqueur de Thoulet durant le processus d'extraction sur les valeurs de $\delta^{13}C$ mesurées par la suite (Figure 8). En effet, les échantillons traités avec la liqueur de Thoulet présentent des $\delta^{13}C$ dont la moyenne est de $-32,5 \pm 1,6$ ‰ tandis que ceux traités sans l'étape à la liqueur ont une moyenne de $-36,3 \pm 3,5$ ‰. On peut donc supposer que la liqueur de Thoulet élimine toujours quelques résidus organiques qui interfèrent sur la mesure du $\delta^{13}C$ lorsqu'ils sont présents. Ceci va dans le sens des observations faites par Amundson et al. (1997) indiquant que le traitement d'extraction utilisé altère le fractionnement isotopique du pollen et que les valeurs de $\delta^{13}C$ varient selon le type d'extraction. Un pollen non traité serait composé de 43 à 48 % de carbone tandis qu'un pollen traité monterait à 64 % en carbone (Amundson et al., 1997), ce qui peut influer sur les mesures de $\delta^{13}C$.

Au niveau de l'extraction de la sporopollénine, il serait donc utile de trouver une méthode plus systématique qui éviterait ce genre de différence entre les séries d'échantillons traités et de

toujours procéder aux mêmes étapes lors de l'extraction, même si certaines semblent inutiles sur une partie des échantillons comme l'utilisation de la liqueur de Thoulet.

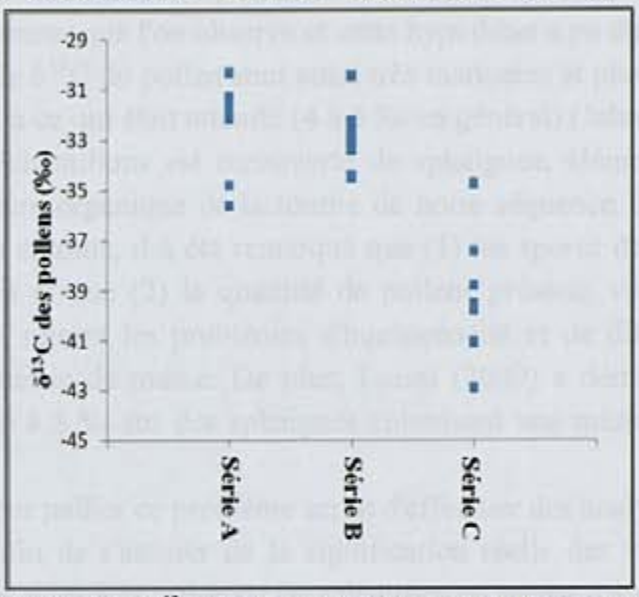


Figure 31 : Répartition des valeurs de $\delta^{13}C$ (‰) des pollens selon les différentes séries traitées

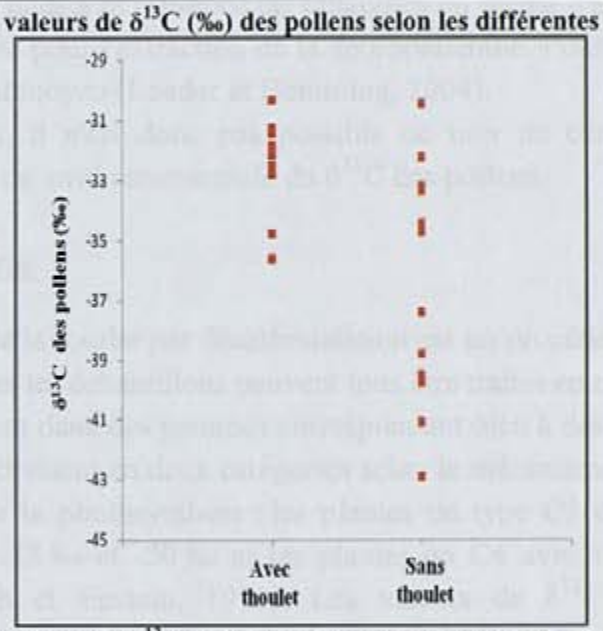


Figure 32 : Répartition des valeurs de $\delta^{13}C$ (‰) des pollens selon la méthode d'extraction utilisée

Un autre inconvénient de la méthode d'analyse utilisée sur les pollens s'est présenté lors des mesures de $\delta^{13}C$. Les pollens étaient conservés dans une solution d'alcool et donc en suspension. Cela avait été fait dans le but de conserver l'échantillon sans risquer de perdre de la matière du fait que les pollens sont des éléments extrêmement volatils. Il a donc fallu prélever une quantité égale de chaque échantillon et ajouter une étape d'évaporation de l'alcool. Bien que cette méthode n'influe pas sur la valeur de $\delta^{13}C$, il serait préférable de trouver un autre moyen de conserver les pollens une fois extraits qui faciliterait les mesures spectrométriques et permettrait de connaître la masse exacte de pollens analysés.

Pour expliquer les valeurs très négatives de $\delta^{13}C$ obtenues sur les pollens, il a d'abord été envisagé que les produits utilisés pour l'extraction aient pu interférer dans l'analyse isotopique si les pollens avaient accroché certaines substances qui n'auraient pas été évaporées correctement. Pour cela, le $\delta^{13}C$ de l'éthanol a été mesuré et sa valeur s'est révélée être de

~-27 ‰. De la même manière, les $\delta^{13}C$ de l'anhydride acétique et de l'acide acétique sont respectivement de -19,5 ‰ et -20,4 ‰ (Amundson et al., 1997). Ces produits ne peuvent donc pas expliquer les différences que l'on observe et cette hypothèse a pu être écartée.

Les variations de $\delta^{13}C$ du pollen sont aussi très marquées et plus nombreuses que pour la tourbe et par rapport à ce qui était attendu (4 à 5 ‰ en général) (Jahren, 2004). La tourbière d'où proviennent les échantillons est recouverte de sphaignes, élément végétal constituant principalement la matière organique de la tourbe de notre séquence. En visualisant certains échantillons de pollens extraits, il a été remarqué que (1) les spores de sphaignes étaient très présentes à chaque fois et que (2) la quantité de pollens présents variait énormément d'un niveau à l'autre ce qui rejoint les problèmes d'homogénéité et de dilution des échantillons rencontrés en spectrométrie de masse. De plus, Loisel (2009) a démontré qu'il existait des variations de $\delta^{13}C$ de 6 à 8 ‰ sur des sphaignes colonisant une même tourbière à quelques mètres de distance.

Une solution pour pallier ce problème serait d'effectuer des analyses isotopiques sur un seul taxon de pollen afin de s'assurer de la signification réelle des variations de $\delta^{13}C$ sans s'inquiéter de variations dues à la présence de sphaignes ou même d'éléments organiques non éliminés par le traitement pour l'extraction de la sporopollénine. Pour cela, un tri manuel à la micropipette reste le seul moyen (Loader et Hemming, 2004).

Pour le moment, il n'est donc pas possible de tirer de conclusions concernant la signification climatique ou environnementale du $\delta^{13}C$ des pollens.

2.6 $\delta^{13}C$ de la tourbe

La préparation de la tourbe par décarbonatation est un procédé simple qui compte peu d'étapes durant lesquelles les échantillons peuvent tous être traités en même temps.

Les $\delta^{13}C$ se situent dans des gammes correspondant bien à des plantes (Fabing, 1996). Les $\delta^{13}C$ des plantes se divisent en deux catégories selon le mécanisme de fixation du dioxyde de carbone au cours de la photosynthèse : les plantes de type C3 dont le $\delta^{13}C$ est le plus souvent compris entre -32 ‰ et -20 ‰ et les plantes en C4 avec un $\delta^{13}C$ se situant entre -17 ‰ et -9 ‰ (Smith et Epstein, 1971). Les valeurs de $\delta^{13}C$ de la tourbe étudiée correspondent à des plantes de type C3, végétation caractéristique de sous-forêt/bois ce qui est le cas de la végétation de la tourbière étudiée et qui correspond avec les relevés palynologiques effectués par J-C Oillic.

On peut donc présumer que cette méthode est fiable et applicable par la suite en utilisant un pas plus fin et régulier de manière à obtenir des informations plus claires, plus complètes et exploitables par la suite sur le climat et l'environnement du passé.

La figure 4 permet de noter que les valeurs des $\delta^{13}C$ de la tourbe et des pollens ne montrent pas les mêmes variations sur toute la séquence. Au-delà des problèmes de variations du $\delta^{13}C$ des spores de sphaignes, il est intéressant de se demander ce que traduisent ces échelles de $\delta^{13}C$ l'une par rapport à l'autre.

Les pollens ne représentent qu'une infime fraction des constituants de la tourbe brute et leur composition chimique est différente (Jahren, 2004). La tourbe est composée principalement de feuilles, racines et branches de végétaux décomposés. La décomposition d'éléments dans le sol appauvrit la matière en lipides (Amundson et al., 1997), lignine,

cellulose tandis qu'elle s'enrichit en acides aminés et groupements carboxyliques (Balesdent, 1991). Les acides aminés ont des $\delta^{13}C$ compris entre -45 ‰ et -15 ‰ (O'Brien et al., 2003) et si certains acides aminés ont été extraits et conservés avec les pollens, leur présence dans une solution sans autres éléments organiques en grand nombre peut être une hypothèse de plus pour expliquer des valeurs si faibles de $\delta^{13}C_{pollens}$ comparées à celles de la tourbe brute.

2.6.1 $\delta^{13}C_{tourbe}$ et paléoenvironnement

Les variations de $\delta^{13}C$ sont en relation avec plusieurs facteurs environnementaux et climatiques (Ferhi et al., 1982) : l'humidité du milieu (Balesdent, 1991 ; Fabing, 1996 ; Kalbitz et Geyer, 2002 ; Tao et al., 2007 ; Skrzypek et al., 2009), la température (Fabing 1996 ; Skrzypek et al., 2009), le type de plantes (Fabing, 1996), le fait que le milieu soit ouvert ou fermé (Balensdent, 1984).

La mise en relation des variations de $\delta^{13}C$ de la tourbe mesurées (figure 4) et des données palynologiques de la même tourbière (figure 3) permet de définir l'impact du climat sur le milieu.

En s'intéressant aux grandes périodes couvertes par la séquence, il est possible de faire quelques observations. Il a déjà été vérifié que le $\delta^{13}C$ de la tourbe correspondait à des plantes dont le cycle photosynthétique était de type C3 caractéristique de plantes de sous-bois et forêt. Des $\delta^{13}C$ plus élevés peuvent indiquer un développement de certaines espèces possédant un cycle photosynthétique différent (C4) (Fabing, 1996 ; Caner et Bourgeon, 2001). Sachant que les $\delta^{13}C_{tourbe}$ les plus négatifs correspondent à une période plus chaude (Skrzypek et al., 2009 ; Ménot et Burns, 2001) et/ou plus humide (Balesdent, 1991 ; Fall et al., 1998 ; Kalbitz et Geyer, 2002), et/ou fermé (Balensdent, 1984), il a été possible d'observer selon les périodes (figure 4, $\delta^{13}C_{tourbe}$; figure 7) :

- Préboréal (~260 à ~200cm) : on note un enrichissement en ^{13}C marquant une période relativement froide (Dansgaard et al., 1969) et un milieu ouvert. Ceci concorde avec la prédominance des Poacées et la présence du pin, du saule et du bouleau.
- Boréal (~200 à ~172 cm) : Les valeurs de $\delta^{13}C$ deviennent un peu plus négatives et traduisent une période de réchauffement (Dansgaard et al., 1969) et un environnement plus fermé et humide. L'apparition et le développement du chêne et du noisetier corroborent cela ainsi que la baisse conséquente des Poacées. Il s'agit d'une période où les forêts se développent conduisant à la fermeture du milieu.
- Atlantique (~172 à ~135 cm) : période chaude et humide (Dansgaard et al., 1969), les $\delta^{13}C$ sont légèrement plus négatifs qu'à la période précédente ce qui traduit des températures un peu plus élevées qu'au Boréal. Il s'agit de l'optimum climatique de l'Holocène avec la présence en particulier du chêne, de l'orme, du noisetier et du tilleul.
- Subboréal (~135 à ~82 cm) : période plus humide dont les $\delta^{13}C$ sont encore plus négatifs entre 110 cm et 135 cm. On a une présence majoritaire de l'aulne et du bouleau. Sous toute réserve et compte tenu du peu de données, les $\delta^{13}C$ remontent ensuite ce qui pourrait être le signe de l'ouverture du milieu.
- Subatlantique (~82 à 0 cm) : Les variations de $\delta^{13}C$ sont plus nombreuses dans cette partie. Le noisetier disparaît lentement et le bouleau, le chêne et l'aulne prédominent avec une période d'apparition du hêtre. À la fin du Subboréal et au début du

Subatlantique, on note une ouverture du milieu puis une phase tendant à nouveau vers un milieu fermé pour s'ouvrir de manière définitive. Ce phénomène suit celui du développement des Poacées. Au Subatlantique, le froid est modéré (Dansgaard et al., 1969) avec des oscillations régulières de la température et les variations de $\delta^{13}C$ semblent suivre cette tendance.

De manière générale, les variations de $\delta^{13}C$ sont un indicateur fiable de changements environnementaux et climatiques. Chacun des éléments pris en compte ici (températures, précipitations, taxons présents ou absents, ouverture du milieu) sont liés les uns aux autres et sont marqueurs de variations significatives de l'environnement étudié. Néanmoins, il sera nécessaire d'affiner le pas d'échantillonnage pour plus de précision dans l'interprétation et son utilisation en contexte archéologique.

2.7 Conclusions et perspectives

Cette étude a permis de démontrer que les méthodes d'extraction de la cellulose du bois et des pollens ont besoin d'être adaptées pour les analyses isotopiques.

Pour les bois fossiles, il faudrait déterminer quelles substances ont pu interférer dans le processus d'extraction et trouver une méthode pour récupérer la cellulose pure si elle est toujours présente dans les échantillons.

Concernant les pollens, il a été montré que les étapes du processus d'extraction pouvaient faire varier fortement les valeurs de $\delta^{13}C$ ainsi que le fait de préparer les échantillons par groupes au lieu de les traiter tous en même temps. Il est donc nécessaire de revoir ce procédé d'extraction et de trouver un meilleur moyen de conditionnement des échantillons pour des mesures spectrométriques plus faciles et fiables. Il est aussi intéressant d'envisager des analyses isotopiques sur un seul taxon de pollen. S'il s'avère qu'une méthode fiable est mise en place dans le futur pour des études sur les pollens, celle-ci pourrait trouver un intérêt particulier dans des applications à des périodes où les sédiments sont moins riches en matière organique, comme au Tardiglaciaire.

Les analyses effectuées sur la tourbe brute lors de cette étude ont donné des résultats concluants et intéressants qui ont été, dans la mesure du possible, rapprochés des informations apportées par la palynologie. Il est donc maintenant envisageable de poursuivre ce procédé en effectuant des analyses isotopiques de $\delta^{13}C$ avec un pas d'échantillonnage plus fin et régulier pour en tirer un maximum d'informations.

Certaines études montrent que les $\delta^{13}C$ peuvent varier selon un taxon particulier, la totalité des taxons ou un groupe de pollens (Aucour et al., 1999 ; Skrzypek, 2009). Cela n'a pas pu être observé à Paimpont en raison du pas de prélèvement des échantillons qui n'était pas régulier. Les $\delta^{13}C$ peuvent aussi varier de manière à retrouver les zonations mises en avant par le diagramme pollinique (Balesdent, 1991 ; Aucour et al., 1999 ; Caner et Bourgeon, 2001). Pour cette étude, il s'agissait avant tout de tester les différentes méthodes applicables aux matériaux à étudier et l'échantillonnage qui en a résulté ne permettait pas de déterminer si ces informations sont repérables ou non dans notre cas. Une étude plus approfondie avec un pas plus régulier pourrait répondre à ces questions et être utilisée en contexte archéologique.

Des études sur la végétation actuelle du Massif armoricain, selon les conditions climatiques actuelles, seraient souhaitables pour permettre de mettre en relation les variations

de $\delta^{13}C$ et/ou $\delta^{18}O$ avec des changements de température ou de précipitation quantifiables (Jahren, 2004 ; Skrzypek, 2009), informations souhaitées par les archéologues.

De telles analyses ont donc démontré qu'il était possible de déterminer les fluctuations de végétation, de température et de précipitation selon les périodes. Ces fluctuations, avec des données en plus grand nombre, pourraient être rapprochées des données concernant les niveaux lacustres (Aucour et al., 1999, Magny, 2004) ou d'autres échelles de $\delta^{13}C$ ou $\delta^{18}O$ déjà connues à des fins de reconstitution climatique à une échelle plus vaste.

De telles reconstitutions des paléoenvironnements seraient bénéfiques à l'archéologie pour étudier les implantations humaines littorales ou continentales selon la tendance climatique des époques, pour déterminer si le climat a joué un rôle sur les types d'habitats construits, pour vérifier si le climat a eu une influence sur l'activité agro-pastorale d'une région. Elles permettraient d'appréhender les phénomènes potentiels d'adaptation aux changements climatiques de la part des populations humaines et de quelle manière on en retrouve les vestiges aujourd'hui.

3. Anthracologie

Près de 1500 charbons provenant de 7 sites archéologiques ont d'ores et déjà été étudiés. Sur le diagramme ci-dessous (Figure 33), il semble se dégager une évolution dans les choix d'approvisionnement en combustible entre les premières opérations en bas-fourneaux à l'Hallstatt et les productions massives de fer et fonte par les Forges au XVIII° et XIX° siècles. Ainsi, les premiers forgerons semblent s'approvisionner à proximité immédiate du site, dans la ripisylve. Il récolte indifféremment feuillus et conifères. Plus tard, à la période gauloise et au début de la période romaine, les artisans semblent accroître leur sélection. Leur choix s'oriente presque uniquement vers le chêne.

Au Moyen-Âge, la diversité taxonomique des échantillons augmente. Elle traduit sans doute une baisse des critères de choix des essences. On constate toutefois que le chêne reste très présent à cette période. Il s'accompagne du charme qui compose à plus de 70 % les échantillons C12 et C21 du Vert Pignon. Cette baisse de sélectivité peut trouver son origine dans l'augmentation des productions : plus les quantités de fer à produire son grandes, plus la quantité de combustibles l'est également. La forêt médiévale n'étant pas uniquement dédiée à la sidérurgie, une baisse des ressources en chêne a pu se produire déclanchant l'utilisation d'autres essences. Une autre hypothèse peut être la transformation de la flore paimpontaise suite à un changement dans le mode d'exploitation de la forêt. Le passage à une gestion sous forme de taillis ou taillis sous futaie a pu favorisé le charme (*Carpinus betulus*) qui repart aisément sur souche contrairement au chêne (*Quercus*).

Enfin, la période moderne se distingue par la prédominance du hêtre (*Fagus*) dans les assemblages au détriment du chêne et du charme. La diversité reste assez semblable à celle du Moyen Âge.

Ces premières observations nécessitent toutefois d'être confirmées par un approfondissement des analyses. Il permettra sur certains sites d'augmenter le corpus pour être statistiquement fiable, alors qu'actuellement un site le Bois Jacob, seuls 33 charbons ont été analysés. Enfin, l'examen dendrologique des charbons devrait nous apporter de nombreuses informations sur les pratiques de collecte et d'utilisation du bois, comme un calibre préférentiel, l'utilisation de bois vert, la pratique du charbonnage…

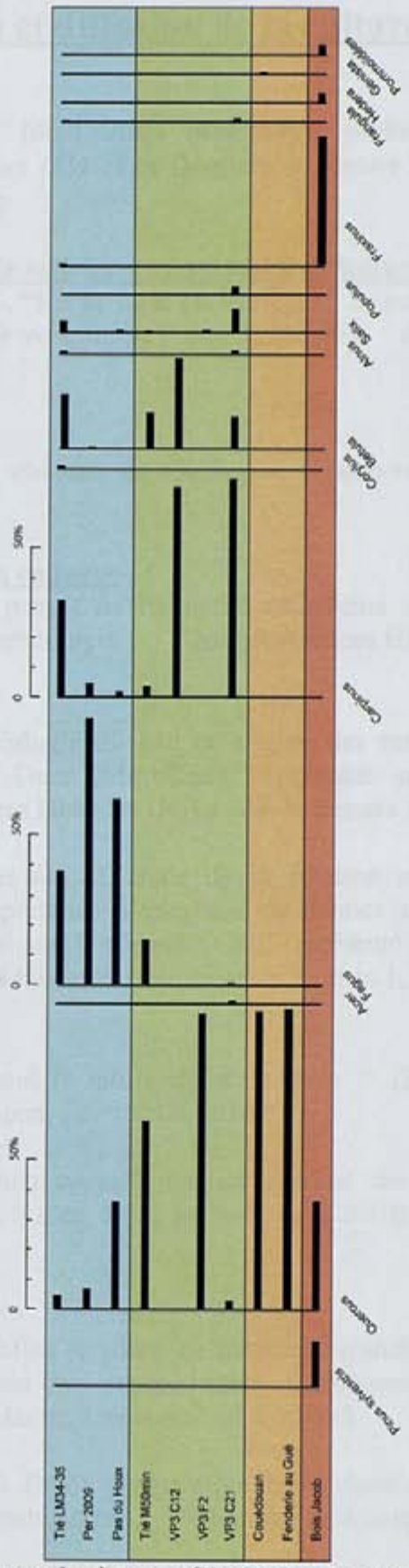


Figure 33 : diagramme anthracologique préliminaire des échantillons de Paimpont (Rouge : 1° Âge du Fer ; Orange : 2° Âge du Fer ; Vert : Moyen-Âge ; Bleu : Période moderne)

Publication et diffusion de la culture scientifiques

- **Ouvrage**

VIVET J.-B. (dir.), 2009. *Métallurgie médiévale et forêt en prélude aux Grandes Forges de Paimpont (35).* Les Dossiers du Centre Régional d'Archéologie d'Alet. N° AF (Rennes, 2009), 205p.

- **Article dans actes de colloques avec comité de lecture**

J.-C. OILLIC, "Fer et forêt en Bretagne : le massif de Paimpont du XVIIe au XXe siècle." *Actes des XXXe rencontres i nternationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes* (2010): 333-347.

- **Note dans revue :**

J.-C. OILLIC, "Le château de Guillerien (Campénéac, Morbihan)," *Archéologie médiévale* 40 : 290.

- **Communications en colloque**

J.-C. OILLIC, "Le massif de Paimpont du 17ème au 20ème siècle" (présenté au Journée du « CReAAH » Archéologie Archéosciences Histoire, Université de Rennes 1, Mars 20, 2010).

E. MERDY, "Archéologie du bâti et origine des matériaux : Du nouveau pour la chapelle Saint-Étienne de Guer (Morbihan)." (présenté au Journée du « CReAAH » Archéologie Archéosciences Histoire, Université de Rennes 1, Mars 20, 2010).

C. LE CARLIER et al., "L'étude de la filiation minerais / scories / objets, en sidérurgie ancienne : L'importance d'une base de donnes archéologique / archéométrique régionale ; premier résultat sur le Grand Ouest" (présenté au Journée du « CReAAH » Archéologie Archéosciences Histoire, Université de Rennes 1, Mars 20, 2010).

- **Poster en colloque**

J.-C. OILLIC, "Quand le taillis cache la forêt !" (Poster présenté au Colloque « Quaternaire » Q7, Besançon, Février 18, 2010).

J.-C. OILLIC, "When copses' practice masked the forest !" (Poster présenté au Workshop LandClim, Lund, Suède, du 22 au 26 août 2010).

- **Mémoire**

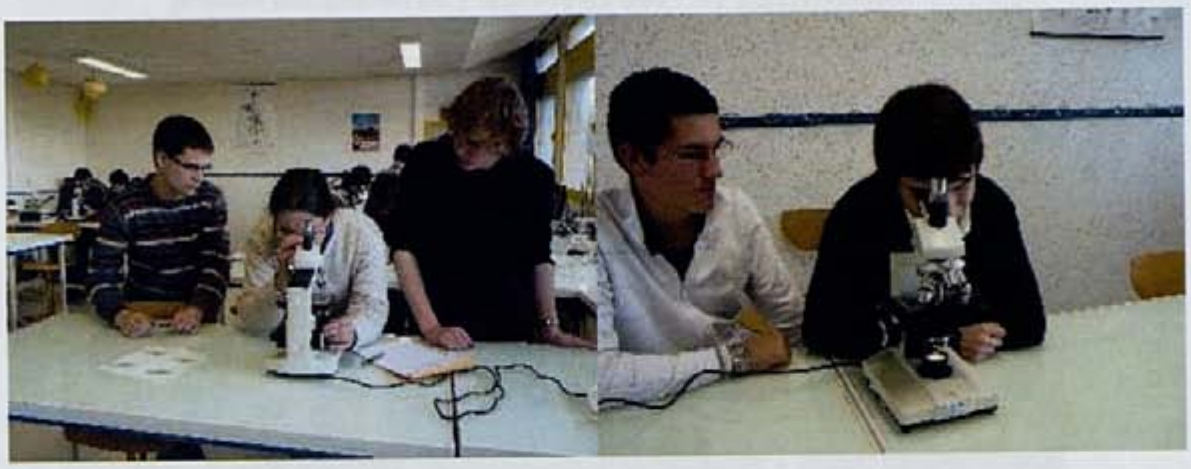
BEIGLE C., 2010. Mise en place de méthodes d'analyses isotopiques sur la matière organique d'une tourbière pour une reconstitution paléoenvironnementale : contribution à l'archéologie. Mémoire de Master. Université de Rennes 1.

JOUNNIER J., 2010. Etude comparative des déchets de la production de fer,en forêt de Paimpont, pendant la Protohistoire. Mémoire de Master 1. Université de Rennes 1.

MERDY E., 2010. Archéologie du bâti et origine des matériaux : du nouveau pour la chapelle Saint-Étienne de Guer (56). Mémoire de Master 1. Université de Rennes 1.

- **Diffusion de la culture scientifique**

  - Intervention au lycée de Guer-Coëtquidan sur les variations climatiques et le paléoenvironnement en forêt de Paimpont (20/01/2010).



Lien : http://www.citescolairebroceliande.fr/index.php/actions-2009-2010/articles/conference-de-m-oillic-apport-de-la-palynologie-dans-letude-des-climats.html

  - Conférence sur l'actualité archéologique en Brécilien (Station biologique de Paimpont, 08/07/2010).

  - Conférence sur la paléométallurgie et son impact environnemental (Fête du fer, 11/07/2010).

- Présentation du patrimoine archéologique de Paimpont au cours du colloque international SOCIOR (13/10/2010).

- Interview sur le thème de la recherche archéologique à Brocéliande dans le journal communal de Plélan-le-Grand : « *PLELANmag*»

Entre pierres & pollens
Jean-Charles Oillic

Jean-Charles Oillic, installé à Plélan depuis peu, soutiendra dans quelques mois sa thèse qui traite de l'impact de l'activité humaine sur son environnement.

Une petite anomalie de terrain, une végétation plus rare ou plus touffue à certains endroits sont peut-être les signes d'une lointaine activité humaine. "C'est parfois imperceptible, explique Jean-Charles Oillic, il faut éduquer son regard." Même si les pinceaux et les grattoirs n'ont pas été relégués au rang d'antiquités, l'archéologie a étendu la panoplie de ses outils. Les images satellites de Google Earth ou de Géoportail lui ont même donné des ailes : un site métallurgique gaulois a été repéré sur le massif de Brocéliande grâce à une concentration de taches rouges (minerais de fer!) identifiables sur les vues aériennes. "La prospection visuelle oriente les recherches, mais notre travail est aussi d'interroger les textes anciens, de faire parler le charbon et les pollens". Et des pollens, Jean-Charles Oillic en a fait son miel. En effet, la caractéristique du pollen est sa coque très résistante qui se conserve très bien dans les tourbières et les étangs. Un carottage au milieu de l'étang de Paimpont a permis d'isoler certains d'entre eux, d'analyser leur morphologie pour faire un saut de 15 000 ans en arrière. Imaginez Brocéliande avant Brocéliande, sans forêt, blanc et glacé, traversé par des troupeaux de rennes ! Pourtant, le jeune archéologue de 28 ans est formel : "le territoire était similaire à celui de la Sibérie. Pour imaginer les séquences de réchauffement, il suffit de visualiser tous les types de paysages entre ici et l'extrême nord de la Russie, et vous aurez une photographie de cette évolution." C'est unique en Bretagne grâce aux tourbières, on a pu se faire une idée assez précise du climat et de la végétation à une époque donnée.

Cependant, Jean-Charles Oillic ne s'attribue pas les mérites de ces recherches : " Je suis arrivé en 2003 pour faire des fouilles sur la forêt de Paimpont, mais avant moi, des passionnés comme Jacques Briard ou Guy Larcher avaient déjà bien éclairci le terrain. C'est un travail de collaboration". Collaboration qui sera formalisée en 2009 avec la création d'un PCR, entendez Programme Collectif de Recherche, qui regroupe une cinquantaine de personnes, bénévoles ou chercheurs. Fédérer les compétences du territoire, il fallait plus qu'y penser, il fallait le faire. Résultat : l'inventaire archéologique sur le massif de Brocéliande avance à grands pas : un millier de charbonnières recensé, 300 sites métallurgiques de la période gauloise et 10 de la période médiévale... Et puis d'autres découvertes qui parlent un peu plus aux néophytes. C'est le cas de cette ancienne digue qui aurait partagé l'étang de Paimpont en deux :" il est possible qu'une partie du lac ait été destinée à la pisciculture tandis que l'autre servait à l'alimentation de moulin" . Détail cocasse, les photos prises par le sonar révèlent plusieurs "griffures" sur les berges du lac. Renseignements pris, il s'agirait des traces laissées par des véhicules amphibies de l'armée française lors de la seconde Guerre mondiale ! La encore, il ne s'agit que d'une petite anomalie de terrain.

Si lors de travaux de labours ou de terrassement, vous découvrez une parcelle qui contient une forte concentration de silex, de tuiles, de machefer....., n'hésitez pas à prévenir Jean-Charles Oillic. L'archéologue en fera un relevé photographique sans rien prélever ou confisquer.

Conclusion et perspectives

Au cours de cette année, les travaux de terrain menés dans le cadre du PCR « Brécilien » se sont principalement concentrés sur le secteur de Paimpont. Nous avons cependant établi un premier bilan des connaissances sur l'ensemble de la zone d'étude grâce, entre autre, à la mise en place de bases de données regroupant les travaux antérieurs, à l'instar de celle réalisée pour les édifices religieux. Cette étape constitue le premier pas pour la suite de la recherche. Nous avons ainsi pu mettre en évidence des périodes ou des zones géographiques, qui vont nécessiter dans les années à venir une attention plus particulière. Il s'agit par exemple de la période du Haut Moyen Âge et du secteur de Saint-Péran.

Cette année, une part importante de la recherche a été consacrée au développement de nouvelles méthodes d'investigation. L'approche isotopique en parallèle de la séquence pollinique du *Pas de la Chèvre* a permis d'adapter les protocoles utilisés dans d'autres contextes sédimentaires aux échantillons de tourbes. La calibration des résultats permettra d'appréhender les variations de température et de précipitation. Elles pourront être mise en vis-à-vis des évolutions culturelles, pour essayer de comprendre dans quelles proportions les changements climatiques ont impacté sur les sociétés.

Le relevé de bâti assisté par Système d'Information Géographique (S.I.G) a été appliqué à l'étude de la chapelle Saint-Etienne de Guer. Il a rendu possible l'application de la méthode statistique à l'ensemble de l'édifice et il en est ressorti une nouvelle lecture de l'histoire de l'édifice. Les nouvelles hypothèses soulevées ouvrent de nouvelles questions concernant les différents états du bâtiment et sur le déroulement des travaux qui y ont été menés.

Plus classiquement, la constitution d'une base de données chimiques sur les minerais et scories de la zone de Paimpont a permis de signer chimiquement la production sidérurgique paimpontaise. Ce premier travail conduit à l'accès prochain à des estimations de consommations en matières premières et de production des différents ateliers. A moyen terme, elle sera confrontée aux signatures chimiques qui seront mesurées dans différents objets archéologiques ferreux et permettra de visualiser les réseaux de diffusion du fer de Paimpont depuis le premier Âge du Fer.

La poursuite de ce programme de recherche s'orientera vers désormais selon 2 axes principaux. Tout d'abord, nous chercherons à compléter les données propres à chaque discipline, comme affiner la typochronologie des fours et des scories ou compléter l'histoire de la végétation pour les périodes actuellement non perçues à cause des hiatus sédimentaires. Dans un second temps, nous en viendrons à confronter les résultats issus des différentes approches pour mieux comprendre les interactions qui ont existé entre les 4 thèmes constitutifs de ce programme de recherche : l'habitat, la métallurgie, les populations religieuses et l'environnement.

La pérennisation de ce programme de recherche sera également l'occasion de valider les méthodes (relevé de bâti, isotopie…) qui ont pu être mise au point au cours de cette première étape. D'une part il sera nécessaire de mieux comprendre les résultats obtenus avec ces méthodes en les recoupant avec d'autres données. D'autre part, ces méthodes n'ayant été appliquées qu'une seule fois, il apparaît nécessaire, pour les valider plus formellement, de les tester sur d'autres sites.

Enfin, dans les années à venir nous poursuivrons également notre volonté de diffusion de résultats obtenus. Auprès de la communauté scientifique, elle passera, entre autre, par des publications scientifiques (4 articles en cours de rédaction) et de communications lors de colloques. Par exemple, 3 ont été proposées pour le colloque du GMPCA qui se tiendra à Liège en avril 2011. En ce qui concerne la diffusion de la culture scientifique et technique,

nous continuerons d'intervenir au près des populations locales et touristiques, notamment grâce à une plus forte collaboration avec l'association Hispamebro (Histoire, Patrimoine et Métallurgie en Brocéliande).

Références bibliographiques.

1. Paléométallurgie

Girault N., 2009. Premiers sondages sur le ferrier médiéval de Péronnette (Paimpont, 35), *In* Métallurgie médiéval et forêt en prélude aux Grandes Forges de Paimpont (Ille et Vilaine), dir. J.-B. Vivet, *Les Dossiers du Ce.R.A.A.*, AF, p. 105-12.

Vivet J.-B., 2009. Activités minières et métallurgiques du massif de Paimpont (35) ; Le site de la Ligne de la Fenderie au Gué à Paimpont (35), rapport d'opération de prospection thématique et sondage, S.R.A. Rennes, 45 p.

Vivet J.-B. (Dir.), 2009. Métallurgie médiévale et forêt en prélude aux *Grandes Forges* de Paimpont (35), *Les Dossiers du Centre Régional d'Archéologie d'Alet*, N° AF, 221 pages.

2. Les sites d'habitat et autres occupations

Oillic J-C., 2010 – Rapport de prospection inventaire sur le massif de Paimpont : bilan 2009. Janvier 2010, UMR 6566 CReAAH, inédit, 45p.

Oillic J-C., 2009 – Rapport de prospection inventaire sur le massif de Paimpont : bilan 2008. Septembre 2009, UMR 6566 CReAAH, inédit, 40p.

3. Patrimoine religieux

Bardel, A., 1991. L'abbaye Saint-Gwénolé de Landévennec, dans Archéologie Médiévale. Paris, pp. 56-101.

Déceneux, M. & Martin, R., 1994. Le Mont-Saint-Michel, Ouest-France, Rennes.

Déceneux, M., 1996. Le Mont-Saint-Michel pierre à pierre, Ouest-France, Rennes.

Déceneux, M., 1998. La Bretagne romane, Ouest-France, Rennes.

Grand, R., 1958. L'art roman en Bretagne, Picard, Paris.

Guigon, P., 1978. La chapelle Saint-Étienne de Guer., Mémoire, Rennes.

Guigon, P., 1987. L'architecture religieuse, dans Le paysage monumental de la France autour de l'an Mil. Paris.

Guigon, P., 1993. L'architecture pré-romane en Bretagne, Le premier art roman, Patrimoine Archéologique de Bretagne., Saint-Malo.

Guigon, P., 1998b. Les églises du haut Moyen-Age en Bretagne, Centre Régional d'Archéologie d'Alet., Saint-Malo.

Lefebvre, B., 2004, Une maison du quartier cathédral de Tours (Indre-et-Loire) : évolution architecturale et techniques de construction, Revue archéologique du Centre de la France, Tome 43, mis en ligne le 01 mai 2006

MacKenzie, W.S., 1994. Atlas des roches sédimentaires, Masson, Paris.

Merdy, E., 2009. Rapport d'opération archéologique du bâti sur la chapelle Saint-Étienne de Guer (56), 2009

Prigent, D., 2005. À la recherche de l'invisible phasage dans Archéologie du bâti, pour une harmonisation des méthodes. Actes de la table ronde 9 et 10 novembre 2001. Paris, pp. P 95-100.

Prigent, D., 1997. Méthodes d'investigations archéologiques utilisées à l'abbaye de Fontevraud. Fontevraud Histoire – Archéologie, n°4, p 17 – 38

Prigent, D., 1989. Étude statistique d'appareils à l'intérieur de l'abbaye de Fontevraud. Aspects méthodologiques, Revue Archéologique de l'Ouest n°06, pp.

Quété, Y., 1975. Évolution géodynamique du Domaine Centre Armoricain au Paléozoïque inférieur : ellipse de Réminiac. thèse. Rennes 1.

Sapin, C., 2000. Archéologie et architecture d'un site monastique : Ve-XXe siècles : 10 ans de recherches à l'abbaye Saint-Germain d'Auxerre Centre d'Études Médiévales., Paris.

4. <u>Paléoenvironnement</u>

Barbier, D., 1999. *Histoire de la végétation du nord-mayennais de la fin du Weichsélien à l'aube du XXIème siècle : mise en évidence d'un tardiglaciaire armoricain :*

interactions homme-milieu, Nantes: Université de Nantes, Groupe d'étude des milieux naturels.

Bigot, B., 1989. Géologie et mégalithes en Brocéliande et Ploërmelais. *Mégalithes de haute Bretagne. Documents d'Archéologie Française. Paris: Maison des Sciences de l'Homme*, p.81–83.

Corillion, R., 1971. *Notice détaillée des feuilles armoricaines : phytogéographie et végétation du Massif armoricain*, Paris: éditions du centre national de la Recherche Scientifique.

Cyprien, A., 2002. *Chronologie de l'interaction de l'homme et du milieu dans l'espace central et aval de la Loire (Ouest de la France)*, Nantes: Université de Nantes, Groupe d'études des milieux naturels.

Girault, N., 2005. *Paléométallurgie en forêt de Paimpont : le site de Trécélien*. Mémoire de DEA, sous la direction de P. Benoît. Paris: Université de Paris 1.

Joly, C., 2006. *Histoire de la végétation dans l'espace centre-ouest atlantique (France). Relations sociétés/végétation et évolution du trait de côte depuis le Mésolithique récent/final*. Thèse de doctorat. Université de Nantes.

Leroyer, C., 1997. *Homme, climat, végétation au tardi- et postglaciaire dans le Bassin parisien : apports de l'étude palynologique des fonds de vallée*, Lille: Atelier national de Reproduction des Thèses.

Limondin-Lozouet, N., Gauthier, A. & Preece, R., 2005. Enregistrement des biocénoses de la première moitié de l'Holocène en contexte tufacé à Saint-Germain-le-Vasson (Calvados). *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, (vol. 16/4), p.255–271.

Marambat, L. & Roussot-Larroque, J., 1989. Paysage végétal et occupations humaines sur la côte atlantique: l'exemple de la Lède du Gurp. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire*, 26(2), p.73–89.

Oldfield, F., 1964. Late-Quaternary deposits at le Moura, Biarritz, south-west France. *New Phytologist*, 63(3), p.374–409.

Ouguerram, A., 2002. *Histoire de la vallée de l'Erdre (affluent de la Loire, Massif armoricain, France) de la fin du Tardiglaciaire aux époques actuelles*, Nantes: Université de Nantes, Groupe d'études des milieux naturels.

Penalba, M.C., 1994. The History of the Holocene Vegetation in Northern Spain from Pollen Analysis. *Journal of Ecology*, 82(4), p.815-832.

Plaine, J., 1991. Géologie du massif de Paimpont. *Glânes en Pays pourpré*, 28, p.4-7.

Roussel, F., 1977. *Les sols et la végétation de la Basse-forêt de Paimpont : étude et cartographie*. Mémoire. Rennes: Université de Rennes 1.

Amundson, R., Evett, R.R., Jahren, A.H., Bartolome, J., 1997. Stable carbon isotope composition of Poaceae pollen and its potential in paleovegetational reconstructions. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 99 : 17-24.

Aucour, A.M., Bonnefille, R., hillaire-Marcel, C., 1999. Sources and accumulation rates of organic carbon in an equatorial peat bog (Burundi, East Africa) during the holocene: carbon isotope constraints. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 150 : 179–189.

Balesdent, J., 1991. Estimation du renouvellement du carbone des sols par mesure isotopique ^{13}C. Précision, risque de biais. *Cahiers Orstom, série Pédologique.*, 26 (4) : 315-326.

Bortoluzzi, E., 2006. Bilan de carbone d'une tourbière anciennement exploitée du Massif du Jura à différents stades de régénération. Thèse de doctorat en Sciences de la Vie et de l'Environnement, Université de Franche-Comté.

Caner, L., Bourgeon, G., 2001. Sur les possibilités de reconstitution paléoenvironnementale offertes par les andosols des hautes terres tropicales. Exemple des Nilgiri (Inde du Sud). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 333 (11) : 725-731.

Chang, C.C.Y., McCormick, P.V., Newman, S., Elliott, E.M, 2009. Isotopic indicators of environmental change in a subtropical wetland. *Ecological Indicators*, 9 (5) : 825-836.

Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Moller, J., Langway, Jr. C.C., 1969. One Thousand Centuries of Climatic Record from Camp Century on the Greenland Ice Sheet. *Science,* 166 (3903) : 377-380.

Descolas-Gros, C., Calleja, M., Cour, P., Richard, P., Perruchietti, C., Jame, P., 2001. Le $\delta^{13}C$ des grains de pollen : intérêt pour l'étude des paléovégétations. *Earth and Planetary Sciences*, 332 : 755–760.

Fabing, A., 1996. Comparaison des enregistrements palynologiques et isotopiques du ^{13}C de quelques tourbières et lacs. Mémoire de DEA systèmes spatiaux et environnement, Université L. Pasteur.

Fall, M., Trimborn, P., Ferhi, A., 1998. Le 13C dans le bois des végétaux, un indicateur pluviométrique pour le Sahel. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences – Earth and Planetary Science,* 326 (6) : 407-412.

Ferhi, A., Gegout, P., Rognon, P., 1982. Premiers résultats paléoclimatiques fournis par l'analyse de l'oxygène 18 dans la matière organique des tourbes. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 1 : 47-51.

Ghosh, P., Brand, W.A., 2003. Stable isotope ratio mass spectrometry in global climate change research. *International Journal of Mass Spectrometry* 228 : 1–33.

Green, J.W., 1963. Wood cellulose. *Methods in Carbohydrate Chemistry*, 3 : 9–20.

Jahren, A.H., 2004. The carbon stable isotope composition of pollen. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 132 : 291– 313.

Kalbitz, K., Geyer, S., 2002. Different effects of peat degradation on dissolved organic carbon and nitrogen. *Organic Geochemistry*, 33 : 319-326.

Leavitt, S. T., Danzer, S. R., 1993. Method for Batch Processing Small Wood Samples to holocellulose for Stable-Carbon Isotope Analysis. *American Chemical Society*, 65 (1) : 87-89.

Lezine, A.M., 2008. Le pollen : outil d'étude de l'environnement et du climat au quaternaire. *Société géologique de France, Vuibert* : 14-15.

Loader, N.J., hemming, D.L., 2004. The stable isotope analysis of pollen as an indicator of terrestrial palaeoenvironmental change: a review of progress and recent developments. *Quaternary Science Reviews,* 23 : 893–900.

Loisel, J., 2009. Reconstitution paléoécologique de deux tourbières boréales à l'Holocène récent dans le basin versant de la rivière Eastmain, Baie-James, Québec. Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec.

Magny, M., 2004. holocene climate variability as reflected by mid-European lake-level fluctuations and its probable impact on prehistoric human settlements. *Quaternary International,* 113 : 65-79.

Ménot, G., Burns, S.T., 2001. Carbon isotopes in ombrogenic peat bog plants as climatic indicators: calibration from an altitudinal transect in Switzerland. *Organic Geochemistry*, 32 : 233-245.

Ménot-Combes, G., Burns, S.T., Leuenberger, M., 2002. Variations of 18O/16O in plants from temperate peat bogs (Switzerland): implications for paleoclimatic studies. *Earth and Planetary Science Letters*, 202 : 419-434.

O'Brien, D.M., Boggs, C.L., Fogel, M.L., 2003. Pollen feeding in the butterfly heliconius charitonia: isotopic evidence for essential amino acid transfer from pollen to eggs. *Proceedings of The Royal Society*, 270 : 2631–2636.

Oillic, J-C, Marcoux, N., Giroult, N., 2009. Étude paléoenvironnementale du site métallurgique de Trécélien. *Les dossiers du Centre Régional d'Archéologie d'Alet* : 191-203.

Skrzypek, G., Baranowska-Kącka, A., Keller-Sikora, A., Jędrysek, M.O., 2009. Analogous trends in pollen percentages and carbon stable isotope composition of holocene peat — Possible interpretation for palaeoclimate studies. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 156 (3-4) : 507-518.

Smith, B.N., Epstein, S., 1971. Two categories of 13C/12C ratios pour higher plants. Plant *Physiology*, 47 : 380-384.

Tao, F., hong, Y., Jiang, h., 1997. Climatic change over the past 8 000 years in Caohai District, Guizhou. *Chinese Science Bulletin*, 42 (5) : 409-413.

Tillman, P.K., holzkämper, S., Kuhry, P., Sannel, A.B.K., Loader, N.J., Robertson, I., 2010. Stable carbon and oxygen isotopes in Sphagnum fuscum peat from subarctic Canada: Implications for palaeoclimate studies. *Chemical Geology*, 270 : 216–226.

Table des illustrations

Figure 1 : Carte de répartition des lieux de résidences des usagers de la forêt de Brécilien mentionnés dans les archives du XV^{ème} siècle. 5
Figure 2 : Zone d'emprise du P.C.R. 6
Figure 3 : carte de localisation du Massif de Paimpont. 7
Figure 4 : carte géologique du Massif de Paimpont. (d'après JJ Chauvel in (Girault 2005)) 9
Figure 5 : carte des précipitations annuelles en Bretagne : moyenne sur la période 1997 – 2006 (d'après les données Météo France) 10
Figure 6 : carte des températures annuelles en Bretagne : moyenne sur la période 1971 - 2000 (d'après les données Météo France) 11
Figure 7 : Pédoséquences théoriques du Massif de Paimpont. a) sur grès. B) sur schistes 12
Figure 8 : carte de répartition des sites paléométallurgiques découvert en 2010. 13
Figure 9 : photographie du four du site de La Boissière 14
Figure 10 : photographie des fours découverts dans le sondage S2 du site de la Fenderie au Gué. 16
Figure 11 : Carte archéologique de la zone PCR en 2009(données SRA Bretagne) 25
Figure 12 : Secteurs prospectés depuis 2008 (en rouge 2008, jaune 2009 et rose 2010) 26
Figure 13 : bilan provisoire de la prospection pour les campagnes 2008 à 2010. 26
Figure 14 : relevé sonar du fond de l'étang de Paimpont 27
Figure 15 : relevé topographique du site de Saint-Étienne. (E. Merdy – J-C. Oillic). 31
Figure 16 : délimitation des six ensembles déterminés à partir des données statistiques (E. Merdy) 35
Figure 17 : délimitation des six ensembles déterminés à partir des données statistiques (E. Merdy). 36
Figure 18 : détermination des quatre ensembles définis à partir de l'analyse statistique (E. Merdy). 38
Figure 19 : détermination des trois ensembles définis à partir de l'analyse statistique (E. Merdy) 39
Figure 20 : Carte de répartition des séquences polliniques. D'Est en ouest : *Le Pas de la Chèvre, Trécélien, Les Noës Blanches* et *le Gué Mony*. 44
Figure 21 : Diagramme pollinique du *Pas de la Chèvre*. 48
Figure 22 : Diagramme pollinique de *Trécélien*. 49
Figure 23 : Diagramme pollinique des *Noës Blanches*. 50
Figure 24 : Diagramme pollinique du *Gué Mony*. 51
Figure 25 : Localisation et étendue de la forêt de Paimpont, Ille-et-Vilaine (35) 54
Figure 26 : Log de la carotte CPC-3 prélevée à Paimpont : données des bois fossilisés (à droite), de stratigraphie (au centre) et de datation (à gauche). 56
Figure 27 : Diagramme pollinique d'une carotte prélevée dans la tourbière du *Carrefour du Pas de la Chèvre* à Paimpont. Étude et données de J-C Oillic (UMR 6566, Centre de Recherches en Archéologie, Archéosciences et histoire, Rennes). 57
Figure 28 : Variation des valeurs de $\delta^{13}C$ (‰) en fonction de la profondeur (cm) du prélèvement pour la tourbe (à gauche) et pour les pollens (à droite) et stratigraphie de la carotte CPC-3. 63
Figure 29 : Variation des valeurs de $\delta^{13}C$ (‰) de la tourbe (en bleu) et du pourcentage de carbone (en rouge) dans la carotte en fonction de la profondeur (cm) 63
Figure 30 : Variation des valeurs de $\delta^{13}C$ (‰) de la tourbe en fonction des valeurs de $\delta^{13}C$ (‰) des pollens. 64
Figure 31 : Répartition des valeurs de $\delta^{13}C$ (‰) des pollens selon les différentes séries traitées 65

Figure 32 : Répartition des valeurs de $\delta^{13}C$ (‰) des pollens selon la méthode d'extraction utilisée 65
Figure 33 : diagramme anthracologique préliminaire des échantillons de Paimpont (Rouge : 1° Âge du Fer ; Orange : 2° Âge du Fer ; Vert : Moyen-Âge ; Bleu : Période moderne) 71